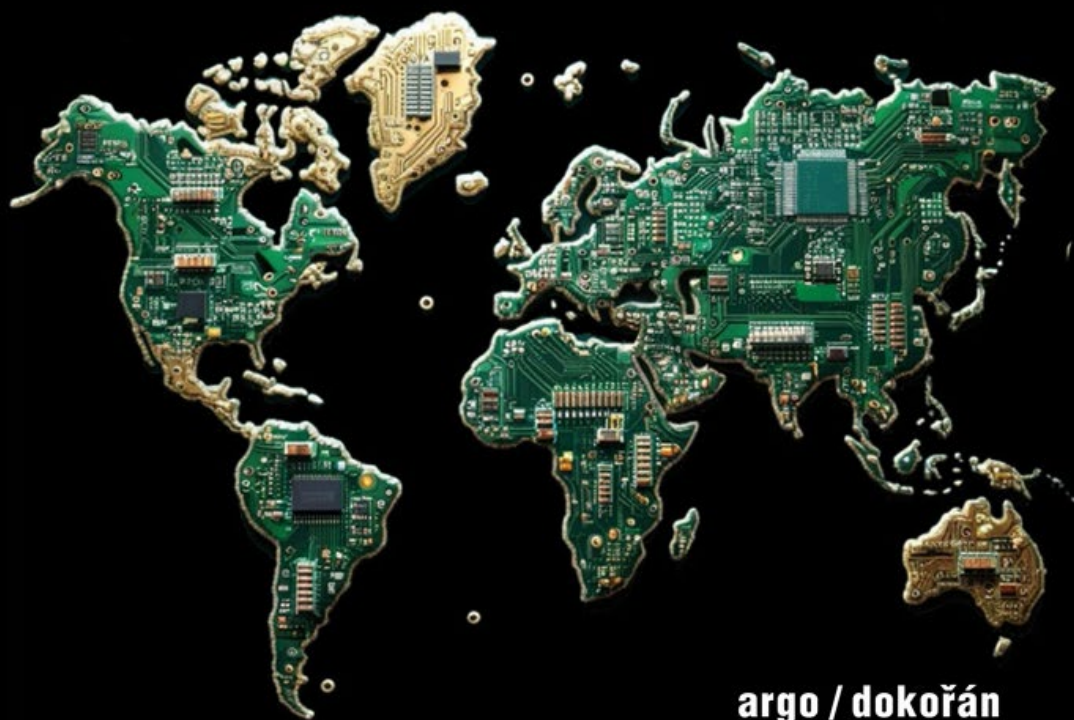


Chris Miller

ČIPOVÉ VÁLKY

Boj o nejdůležitější technologii na světě



argo / dokořán

Chris Miller

ČIPOVÉ VÁLKY

Boj o nejdůležitější technologii na světě

ARGO / DOKOŘÁN

Chris Miller

ČIPOVÉ VÁLKY

Boj o nejdůležitější technologii na světě

Copyright © 2022 by Christopher Miller

Translation © Ondřej Prokop, 2024

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této publikace nesmí být rozmnožována a rozšiřována jakýmkoli způsobem bez předchozího písemného svolení nakladatele.

Druhé vydání v českém jazyce (první elektronické).

Z anglického originálu *Chip War: The Fight for the World's Most Critical Technology* přeložil Ondřej Prokop.

Odpovědný redaktor Jan Kárník.

Redakce Alžběta Knappová

Obálka, sazba podle návrhu Pavla Růta

a konverze do elektronické verze Michal Puhač.

Vydalo v roce 2024 nakladatelství Dokořán, s. r. o., Holečkova 9, Praha 5,
dokoran@dokoran.cz, www.dokoran.cz,
jako svou 1 295. publikaci (438. elektronická).

ISBN 978-80-7675-207-8

Věnováno Liye

OBSAH

Hlavní postavy	9
Slovníček pojmů	11
Úvod	13
ČÁST I. ČIPY Z OBDOBÍ STUDENÉ VÁLKY	
Kapitola 1. Od oceli ke křemíku	23
Kapitola 2. Vypínač	27
Kapitola 3. Noyce, Kilby a integrovaný obvod	30
Kapitola 4. Raketový start	33
Kapitola 5. Minomety a sériová výroba	36
Kapitola 6. Prostě. Chci. Zbohatnout.	40
ČÁST II. OKRUHY AMERICKÉHO SVĚTA	
Kapitola 7. Sovětské Silicon Valley	45
Kapitola 8. „Okopírujte to“	49
Kapitola 9. Prodavač tranzistorů	52
Kapitola 10. „Holky od tranzistorů“	57
Kapitola 11. Přesný zásah	61
Kapitola 12. Dodavatelské řetězce a státnictví	64
Kapitola 13. Revolucionáři z Intelu	67
Kapitola 14. Kompenzační strategie Pentagonu	71
ČÁST III. ZTRACENÉ VŮDČÍ POSTAVENÍ?	
Kapitola 15. „Je to tvrdá konkurence“	79
Kapitola 16. „S Japonskem jsme ve válce“	82
Kapitola 17. „Prodává šmejdy“	86
Kapitola 18. Ropa osmdesátých let	90
Kapitola 19. Spirála smrti	94
Kapitola 20. Japonsko, které umí říct „ne“	99
ČÁST IV. AMERIKA ZNOVUVZKŘÍŠENÁ	
Kapitola 21. Pan Brambora	107
Kapitola 22. Disruptivní inovace Intelu	112
Kapitola 23. Nepřítel mého nepřítele a vzestup Koreje	116
Kapitola 24. „Tohle je budoucnost“	119
Kapitola 25. KGB a jeho Ředitelství T	123
Kapitola 26. Zbraně hromadného ničení	126

Kapitola 27. Válečný hrdina	130
Kapitola 28. „Studená válka skončila a vyhráli jste ji vy“	133

ČÁST V. INTEGROVANÉ OBVODY, INTEGROVANÝ SVĚT?

Kapitola 29. Tchaj-wan chce čipový průmysl	139
Kapitola 30. „Polovodiče musejí vyrábět všichni“	144
Kapitola 31. „Sdílet boží lásku s Číňany“	149
Kapitola 32. Litografické války	153
Kapitola 33. Dilema inovátora	158
Kapitola 34. Běžíme rychleji než ostatní?	163

ČÁST VI. OFFSHOROVÁNÍ INOVACÍ?

Kapitola 35. „Opravdoví chlapi mají továrny“	171
Kapitola 36. Revoluce bez továren	174
Kapitola 37. Velká aliance Morrise Changa	178
Kapitola 38. Apple Silicon	183
Kapitola 39. EUV	186
Kapitola 40. „Plán B neexistuje“	191
Kapitola 41. Jak Intel zapomněl inovovat	194

ČÁST VII. VÝZVA JMÉNEM ČÍNA

Kapitola 42. Made in China	201
Kapitola 43. „Zahájit útok“	204
Kapitola 44. Transfer technologií	209
Kapitola 45. Nevyhnutelné fúze	214
Kapitola 46. Vzestup firmy Huawei	219
Kapitola 47. 5G budoucnost	224
Kapitola 48. Další kompenzační strategie	227

ČÁST VIII. PŘÍŠKRCENÉ ČIPY

Kapitola 49. Základním kamenem všeho...	237
Kapitola 50. Futienká Jinhua	243
Kapitola 51. Útok na Huawei	247
Kapitola 52. Čínská sputniková krize?	252
Kapitola 53. Nedostatek a dodavatelské řetězce	257
Kapitola 54. Tchajwanské dilema	263
Závěr	271

<i>Poděkování</i>	277
<i>Poznámky</i>	281
<i>Rejstřík</i>	328

HLAVNÍ POSTAVY

Žen Čeng-fej. Zakladatel firmy Huawei, čínského giganta v oboru telekomunikace a návrhu čipů. Jeho dcera Meng Wan-čou byla v roce 2018 zatčena v Kanadě a obviněna z porušování amerických zákonů a za snahu vyhnout se americkým sankcím.

Andy Grove. V osmdesátých a devadesátých letech 20. století byl výkonným ředitelem ve firmě Intel. Proslulý svým agresivním stylem a úspěšným oživením Intelu. Autor knihy *Only the Paranoid Survive* (Přežijí jen paranoici).

Pat Haggerty. Ředitel Texas Instruments. Firmu vedl, když se specializovala na výrobu mikroelektroniky, kterou odebírala také americká armáda.

Morris Chang. Zakladatel firmy Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), nejdůležitějšího výrobce čipů na světě. Bývalý vysoce postavený manažer ve společnosti Texas Instruments.

Jack Kilby. V roce 1958 spoluvynalezl integrovaný obvod. Dlouholetý zaměstnanec Texas Instruments. Laureát Nobelovy ceny.

Jay Lathrop. Spoluvynálezce fotolitografie, procesu, při němž se za pomoci speciálních chemikálií a světla vytváří struktura tranzistoru. Dříve působil v Texas Instruments.

Carver Mead. Profesor na Kalifornském technologickém institutu (Caltech); poradce společností Fairchild Semiconductor a Intel; vizionář v oblasti budoucnosti technologií.

Gordon Moore. Spoluzakladatel firem Fairchild Semiconductor a Intel. Autor „Moorova zákona“, který předpověděl, že se výpočetní výkon na jeden čip každých několik let zdvojnásobí.

Akio Morita. Spoluzakladatel společnosti Sony. Spoluautor eseje *The Japan That Can Say No* (Japonsko, které umí říct „ne“). Během sedmdesátých a osmdesátých let byl na mezinárodní scéně zástupcem japonského byznysu.

Robert Noyce. Spoluzakladatel firem Fairchild Semiconductor a Intel. Spoluvynálezce integrovaného obvodu z roku 1959. Známy jako „Starosta Silicon Valley“. První vedoucí neziskového konsorcia Sematech.

William Perry. Mezi lety 1977 a 1981 pracoval v Pentagonu. V letech 1994–97 byl americkým ministrem obrany a prosazoval, aby se za použití čipů vyráběly přesné zbraně.

Jerry Sanders. Zakladatel a výkonný ředitel Advanced Micro Devices (AMD). Nejokázalejší obchodník v Silicon Valley. Silný kritik japonských obchodních praktik z osmdesátých let, jež pokládal za neférové.

Charlie Sporck. Když měl na starosti výrobu ve firmě Fairchild Semiconductor, trval na přesunu části výroby čipů do zahraničí. Později se stal výkonným ředitelem společnosti National Semiconductor.

SLOVNÍČEK POJMŮ

Arm (Arm Holdings plc). Britská firma, která výrobcům čipů licencuje svou architekturu instrukční sady – souboru základních instrukcí, jež určují, jak má daný čip pracovat. Architektura ARM dominuje na poli mobilních zařízení a pomalu se také rozšiřuje v počítačích a datových centrech.

CPU (*central processing unit*). Typ „univerzálního“ čipu, který má v počítačích, mobilech a datových centrech na starost většinu výpočtů.

Čip (také integrovaný obvod). Malý kousek polovodivého materiálu, obvykle křemíku, na který jsou nanesené miliony až miliardy mikroskopických tranzistorů.

DRAM (*dynamic random access memory*). Dynamická paměť s náhodným přístupem. Jeden ze dvou hlavních typů paměťových čipů, který se používá na dočasné ukládání dat.

EDA (*electronic design automation*). Automatizace elektronického návrhu. Speciální software, v němž se navrhuje rozmístění milionů až miliard tranzistorů na čipu a simuluje jejich činnost.

FinFET. Nová 3D struktura tranzistoru, která se začala používat po roce 2010. Jejím cílem je lépe řídit funkci tranzistorů, jež se zmenšily až na úroveň nanometrů.

Fotolitografie. Také známá jako litografie. Proces prosvěcování vzorovaných masek světlem nebo ultrafialovým zářením. Světlo pak interaguje s chemickými látkami fotorezistu a tvaruje vzory na křemíkových plátcích.

GPU (*graphics processing unit*). Grafický procesor. Čip schopný paralelních výpočtů, což je užitečné jak v grafice, tak třeba v aplikacích s umělou inteligencí.

Křemíkový plátek. Kruhový kus ultra čistého křemíku o průměru 20–30 cm, z něhož se vyrábějí čipy.

Logický čip. Čip, který zpracovává data.

NAND. Často také „flash paměť“. Druhý hlavní typ paměťového čipu, sloužící pro delší uchování dat.

Paměťový čip. Čip, který si pamatuje data.

RISC-V. Open-source architektura, jejíž popularita roste, protože je na rozdíl od architektur ARM a x86 zdarma. Vývoj architektury RISC-V částečně financovala americká vláda, ale nyní je populární v Číně, jelikož nepodléhá americkým vývozním kontrolám.

Tranzistor. Miniaturní elektronický „spínač“. V zapnuté poloze představuje hodnotu 1, vypnutý tranzistor má hodnotu 0. Tímto způsobem se vytvářejí řetězce jedniček a nul, které stojí v pozadí všech digitálních výpočtů.

x86. Architektura instrukční sady, která je dominantní v osobních počítačích a datových centrech. Dvěma hlavními výrobci těchto čipů jsou Intel a AMD.

ÚVOD

Dne 18. srpna 2020 vplul do severní části tchajwanského průlivu torpédoborec *USS Mustin*. Jeho kanón ráže 127 mm mířil na jih. Úkolem sólové mise tohoto plavidla bylo proplout průlivem a znovu zdůraznit, že tyto mezinárodní vody *neovládá* Čína – alespoň zatím ne. Cestou na jih se přes palubu od jihozápadu přehnal silný poryv větru. Vysoká oblaka vrhala stíny na moře, jež sahá až ke slavným městům, jakými jsou Fu-čou, Sia-men nebo Hongkong, a k dalším přístavům rozestým po jihočínském pobřeží. Směrem na východ se v dáli ukazoval Tchaj-wan se svou širokou, hustě osídlenou pobřežní rovinou, jež přechází ve vysoké vrcholy skryté v mracích. Na palubě lodi si člen námořnictva v typické kšiltovce a ústní roušce dalekohledem prohlédl obzor. Vody byly plné obchodních nákladních lodí, které převážely zboží z asijských továren spotřebitelům po celém světě.

V tmavé místnosti uvnitř *USS Mustin*¹ seděli námořníci před řadou zářících obrazovek, na nichž se zobrazovala data z letadel, bezpilotních letounů, lodí a satelitů sledujících pohyb v Indo-Pacifiku. Signál z radaru nad můstkem cestoval rovnou do lodních počítačů. Na palubě byla připravena odpalovací zařízení s devětašedesáti raketovými sily. Z každého z nich mohla vyletět raketa schopná přesně zasáhnout letadla, lodě či ponorky na desítky, a dokonce stovky kilometrů. Během krizí studené války používala americká armáda na obranu Tchaj-wanu výhružky svou hrubou jadernou silou. Dnes se spoléhá na mikroelektroniku a přesné údery.

Zatímco se torpédoborec plný počítačem naváděných zbraní plavil průlivem, Čínská lidová osvobozenecá armáda oznámila sérii odvetných cvičení s ostrou municí, která se měla odehrát v blízkosti Tchaj-wanu. Jedny noviny podléhající Pekingu napsaly, že půjde o nácvik „operace znovusjednocení silou“.² Přesto si toho dne čínští vedoucí představitelé nedělali takové starosti s americkým námořnictvem, ale s téměř neznámým nařízením Ministerstva obchodu USA zvaným Entity List, které omezuje pohyb amerických technologií do zahraničí. Původním účelem Entity Listu bylo znemožnit prodej vojenských systémů jako například raketových součástek nebo jaderného materiálu. Vláda Spojených států teď však dramaticky zpřísnila pravidla ohledně počítačových čipů, které se staly všudypřítomnou součástí jak vojenských systémů, tak spotřebního zboží.

Opatření cílilo na firmu Huawei, čínského technologického giganta, jenž prodává smartphony, telekomunikační vybavení, cloudové výpočetní služby a další pokročilé technologie. Spojené státy se obávaly, že produkty Huawei se

dostaly na tak atraktivní ceny – částečně kvůli čínským vládním subvencím –, že se zakrátko stanou páteří telekomunikačních sítí nové generace. Došlo by k oslabení americké dominance na poli celosvětové technologické infrastruktury a Čína by získala větší geopolitický vliv. Spojené státy v reakci na tuto hrozbu zakázaly Huawei nákup vyspělých počítačových čipů vyrobených pomocí amerických technologií.

Globální expanze čínské firmy se zastavila. Najednou nebylo možné vyrobit celé produktové řady. Tržby se propadly. Korporátní obr se kvůli nedostatku technologií zadusil. Podnik Huawei zjistil, že je stejně jako ostatní čínské firmy naprosto závislý na zahraničních výrobcích čipů, na které se spoléhá veškerá moderní elektronika.

Křemíkové čipy – po nichž se jmenuje Silicon Valley, tedy „Křemíkové údolí“ – mají Spojené státy stále pevně pod kontrolou, přestože došlo k nebezpečnému oslabení jejich pozice. Čína momentálně za dovoz čipů zaplatí ročně víc než za import ropy. Tyto polovodiče najdete ve všemožných zařízeních od smartphonů po ledničky, které asijská velmoc spotřebovává doma nebo je vyváží po celém světě. Amatérští stratégové teoretizují o čínském „Malackém dilematu“ – jedná se o odkaz na hlavní dopravní kanál mezi Pacifikem a Indickým oceánem – a o schopnosti země zajistit si v případě krize přístup k ropě a dalším komoditám. Peking se však mnohem víc obává blokády, jejíž dopad by se počítal v bajtech, a nikoliv v barelech. Čína používá své nejlepší mozky a vynakládá miliardy dolarů, aby vyvinula vlastní technologii polovodičů ve snaze vysvobodit se z amerického čipového sevření.³

Pokud se to Pekingu podaří, promění globální ekonomiku a přenastaví rozložení vojenských sil. Druhou světovou válku rozhodly ocel a hliník, studenou válku nedlouhou poté zase definovaly jaderné zbraně. Rivalita mezi Spojenými státy a Čínou by se pravděpodobně mohla odehrávat na poli výpočetního výkonu. Stratégové v Pekingu i Washingtonu si nyní uvědomují, že všechny vyspělé technologie – od strojového učení po raketové systémy, od autonomních vozidel po ozbrojené drony – vyžadují špičkové čipy, známé také pod svým formálnějším názvem jako integrované obvody. Jejich výrobu kontroluje jen hrstka firem.

O čipech přemýšlíme zřídka, ale přitom stojí za zrodem moderního světa. Osudy národů se odvíjely od jejich schopnosti využít výpočetní výkon. Bez obchodu s polovodiči a elektronikou, která díky čipům může vznikat, by globalizace, jak ji dnes známe, neexistovala. Americká vojenská převaha z velké části pramení ze schopnosti využívat čipy pro vojenské účely. Obrovský růst, který Asie za poslední půlstoletí zaznamenala, stojí na křemíkových základech, protože se tamní rostoucí hospodářství specializovala na výrobu polovodičů a na montování počítačů a chytrých telefonů, které fungují právě díky těmto integrovaným obvodům.

Jádrem výpočetní techniky jsou miliony a miliony jedniček a nul. Z těchto dvou čísel se skládá celý digitální vesmír. Každé tlačítko na vašem iPhone, všechny e-maily, fotky nebo videa na YouTube jsou zakódované do dlouhých řetězců jedniček a nul. Ta čísla ale ve skutečnosti neexistují. Vyjadřují stav elektrického proudu, který buď proudí (1), nebo ne (0). Čip je síť z milionů nebo miliard *tranzistorů*: malinkých elektrických spínačů, které se vypínají a zapínají, aby tato čísla zpracovaly, zapamatovaly si je a přeměnily reálné vjemy jako obrázky, zvuk nebo rádiové vlny na mnoho milionů jedniček a nul.

Torpédoborec *USS Mustin* se plavil dál na jih. Továrny a výrobní linky na obou stranách průlivu mezitím ve velkém produkovaly součástky pro nový iPhone 12, který měl jít do prodeje za pouhé dva měsíce, v říjnu 2020. Asi čtvrtina tržeb čipového průmyslu pochází z trhu s mobily⁴ – velkou část ceny nového telefonu tvoří právě polovodičové součástky uvnitř. V posledních deseti letech platí, že každá nová generace iPhone v sobě má jeden z nejvýkonnějších procesorových čipů na světě. Aby takový chytrý telefon mohl fungovat, potřebuje něco přes deset integrovaných obvodů. Různé čipy mají na starost baterii, bluetooth, wifi, připojení k mobilní síti, audio, fotoaparát a další.

Apple z těchto čipů nevyrobí ani jeden. Většinu si kupuje – paměťové čipy od japonského výrobce Kioxia, čipy pro rádiové frekvence od kalifornské firmy Skyworks, zvukové čipy zase od Cirrus Logic z texaského Austinu.⁵ Extrémně komplexní procesory, na nichž běží operační systém iPhone, si Apple navrhuje sám, ale ani technologický kolos z kalifornského Cupertino je nedokáže vyrobit. A nesvede to ani žádná jiná firma v USA, Evropě, Japonsku nebo v Číně. Nejvyspělejší čipy Applu – pravděpodobně nejvyspělejší na světě – dnes umí vyrobit jen jediná společnost v jedné budově, v nejdražší továrně celé historie,⁶ která se 18. srpna dopoledne nacházela jen pár desítek kilometrů na levobok od *USS Martin*.

Výroba a miniaturizace polovodičů patří mezi největší výzvy současnosti. V dnešní době žádná firma nevyrobí čipy s větší přesností než Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, známější jako TSMC. Když v roce 2020 světem zmítaly lockdowny způsobené virem o průměru asi sto nanometrů (miliardtin metru), v nešpičkovějším zařízení podniku TSMC zvaném Fab 18 vznikala mikroskopická bludiště z miniaturních tranzistorů a leptaly se tvary dvakrát menší než koronavirus a stokrát menší než mitochondrie z buněčného jádra. TSMC tento proces replikovalo v měřítku, jaké v historii nemělo obdoby. Modelů iPhone 12 se prodalo 100 milionů.⁷ Každý obsahoval čip A14 s 11,8 miliardami miniaturních tranzistorů vypálených do křemíku. Zařízení Fab 18 firmy TSMC tedy během několika měsíců vyrobilo jen pro jeden z mnoha čipů, jež se v iPhone nacházejí, hodně přes jeden trilion tranzistorů – což je jednička a za ní osmnáct nul. Čipový průmysl v roce 2020 vyrobil víc tranzistorů, než kolik

kusů zboží vyprodukovala všechna ostatní odvětví dohromady za celou historii lidstva. Tomu číslu se nikdo ani zdaleka nepřiblížil.

Ještě před šedesáti lety se přitom na nejmodernější čip nevešlo 11,8 miliardy tranzistorů, ale čtyři.⁸ V roce 1961 ohlásil Fairchild Semiconductor, malý podnik se sídlem jižně od San Francisca, nový produkt s názvem Micrologic. Byl to křemíkový čip se čtyřmi tranzistory. Zanedlouho firma dokázala na jeden čip vměstnat tranzistorů 12, poté 100. Spoluzakladatel společnosti Gordon Moore si v roce 1965 všiml, že díky práci inženýrů, kterým se dařilo vyrábět stále menší a menší tranzistory, se počet komponentů, jež je možné umístit na jeden čip, každý rok zdvojnásoboval. Tato prognóza – že výpočetní výkon čipů poroste exponenciálně – nakonec získala pojmenování „Moorův zákon“ a Moore na jejím základě předpověděl vynálezy, jež v roce 1965 zněly nepředstavitelně futuristicky: „elektronické náramkové hodinky“, „domácí počítače“, a dokonce „osobní přenosná komunikační zařízení“. Moore predikoval exponenciální růst na následující dekádu, ale pokrok tímto ohromným tempem pokračoval víc než půl století. V roce 1970 představil Intel – druhá firma, kterou Moore založil – paměťový čip, jenž si dokázal zapamatovat 1 024 jednotlivých informací (bitů). Stál asi 20 dolarů, zhruba dva centy za bit.⁹ Dnes si za dvacet dolarů člověk koupí USB disk, na který se bitů vejde o mnoho víc než miliarda.

Když se řekne Silicon Valley, vybaví se nám spíš sociální síť a softwarové firmy než materiál, po němž se údolí jmenuje. Internet, cloud, sociální síť a celý digitální svět přitom existují pouze díky tomu, že se inženýři naučili ovládat i ty nejnepatrnější pohyby elektronů, které se prohánějí po kouskách křemíku. Kdyby za posledních padesát let neklesla mnohomiliardkrát cena zpracovávání a ukládání jedniček a nul, velké technologické firmy, jak je známe dnes, by nikdy nevznikly.

K tomuto ohromnému růstu došlo částečně díky geniálním vědcům a fyzikům s Nobelovými cenami, ale ne každý vynález znamená vznik úspěšného startupu a ne z každého startupu vznikne nové odvětví, které změní celý svět. Polovodiče se rozšířily po celém světě, protože firmy přicházely s novými technikami, jež jim umožnily vyrábět je po milionech, protože ambiciózní manažeři neustále snižovali jejich cenu a protože kreativní podnikatelé nacházeli nové způsoby, jak integrované obvody využít. Vznik Moorova zákona je příběhem, v němž hrají odborníci na výrobu, specialisté na dodavatelské řetězce a marketingoví manažeři stejně důležitou roli jako fyzikové a elektroinženýři.

Města jižně od San Francisca – jimž se začalo přezdívat Silicon Valley až po roce 1970 – se stala epicentrem této revoluce, jelikož v sobě kombinovala vědecké znalosti, výrobní know-how a vizionářské obchodní myšlení. V Kalifornii bylo mnoho inženýrů se zkušenostmi z leteckého a rádiového průmyslu, kteří měli tituly ze Stanfordovy univerzity a z Kalifornské univerzity v Berkeley.

Americká armáda se snažila upevnit svou technologickou převahu, a tak na obou vysokých školách nebyla nouze o dolary z obranného rozpočtu. Stejně důležitou úlohu jako ekonomický systém však měla i kalifornská kultura. Lidé, kteří opustili americké východní pobřeží, Evropu a Asii, aby vybudovali čipový průmysl, často jako důvod k přesunu do Silicon Valley uváděli pocit nekonečných příležitostí. Pro nejchytřejší inženýry na světě a většinu kreativních podnikatelů na planetě zkrátka neexistovalo zajímavější místo.

Jakmile čipový průmysl získal základní obrysy, ukázalo se, že ho ze Silicon Valley nic nevytlačí. Dnešní dodavatelský řetězec polovodičů obsahuje komponenty z mnoha měst a zemí, ale téměř každý čip má svou stopu v Kalifornii, nebo je alespoň vyrobený pomocí nástrojů tam navržených a zkonstruovaných. Obrovská zásoba amerických vědeckých znalostí, které jsou podporovány vládním financováním výzkumu a ještě rozšiřovány schopností přetahovat nejlepší vědce z jiných zemí, poskytla základní odbornost, která se stala hnacím motorem technologického pokroku. Americká síť firem s rizikovým kapitálem a burzovní trhy poskytly startovní kapitál, jenž firmy potřebují k rozvoji, a zároveň nemilosrdně vystrnadily neúspěšné společnosti. Největší spotřebitelský trh na světě mezitím poháněl ekonomický růst, z něhož se po desetiletí financoval výzkum a vývoj nových typů čipů.

Ostatní země se samy o sobě americkému tempu nedokázaly vyrovnat, ale zaznamenaly úspěch, když se těsně začlenily do dodavatelských řetězců Silicon Valley. Evropa má izolované ostrovy odborných znalostí v oblasti polovodičů, obzvláště pokud jde o produkci strojů potřebných pro výrobu čipů nebo o design čipových architektur. Asijské vlády na Tchaj-wanu, v Jižní Koreji a Japonsku se do průmyslu prodraly přes vládní dotace, financování vzdělávacích programů, podhodnocení svých měn a zavádění cel na importované čipy. Tato strategie jim přinesla určité možnosti, které jiné země nemohou napodobit, ale úspěchů dosáhly jen ve spolupráci se Silicon Valley a nadále se spoléhají hlavně na americké nástroje, software i zákazníky. Nejúspěšnější americké firmy zaměřené na čipy mezitím rozprostřely své dodavatelské řetězce po celém světě, čímž snížily náklady a vytvořily know-how, které umožňuje další fungování Moorova zákona.

Díky Moorovu zákonu jsou dnes polovodiče součástí všech zařízení, jež vyžadují výpočetní výkon, což se v době internetu věci týká v podstatě všech. I sto let staré výrobky jako třeba automobily v sobě teď mívají čipy v ceně asi tisíc dolarů. Většina světového HDP vzniká za použití přístrojů s polovodiči. Na to, že před pětasedmdesáti lety tato technologie ještě neexistovala, je to výjimečný vzestup.

Když se v srpnu roku 2020 americký torpédoborec plavil dál na jih, celý svět si teprve začínal uvědomovat, že je závislý na polovodičích, a tudíž i na Tchaj-wanu, kde se vyrábí čipy zajišťující třetinu nového výpočetního výkonu, který každý rok využíváme.¹⁰ Tchajwanská TSMC produkuje skoro všechny nejvyspělejší čipy na

světě.¹¹ Když v roce 2020 udeřil covid, ovlivnil i polovodičový průmysl. Některé továrny dočasně zavřely. Nákupy čipů do automobilů se propadly. Velká část světa se připravovala na práci z domova, poptávka po procesorech do osobních počítačů a datových center proto naopak ještě vzrostla. V průběhu roku 2021 došlo k sérii nešťastných událostí. V japonské továrně na polovodiče vypukl požár a přes Texas, americké centrum výroby čipů, se přehnaly ledové bouře. K tomu se přidaly další lockdowny v Malajsii, kde se mnoho čipů kompletuje a testuje, což celou situaci ještě zhoršilo. Mnoho odvětví daleko od Silicon Valley se náhle začalo potýkat s kritickým nedostatkem čipů. Velké automobilky od Toyoty po General Motors musely na celé týdny zastavit výrobu,¹² protože se jim nedařilo získat potřebné součástky. Kvůli nedostatku i těch nejjednodušších polovodičů se zavíraly továrny na opačné straně zeměkoule. Vypadalo to jako dokonalý obrázek selhávající globalizace.

Politici lídři v USA, Evropě a Japonsku se nad polovodiči po desetiletí moc nepozastavovali. Stejně jako my si pod pojmem technologie představovali vyhledávače a sociální sítě, nikoliv křemíkové destičky. Když se Joe Biden a Angela Merkelová ptali, proč jejich automobilky nevyrábějí, odpověď spočívala v neuvěřitelně složitých dodavatelských řetězcích polovodičových součástek. Takový typický čip může mít design podle plánů firmy Arm, která působí ve Velké Británii a má japonské vlastníky. Pracuje na něm tým inženýrů z Kalifornie a Izraele, který používá software z USA. Když je návrh čipu hotový, pošle se do zařízení na Tchaj-wanu, které nakupuje ultra čisté křemíkové destičky a speciální plyny z Japonska. Design je přenesen na křemík pomocí nejpřesnějších strojů na světě, které dokážou leptat, nanášet a měřit vrstvy materiálů o tloušťce několika atomů. Tyto stroje produkuje pět hlavních společností - jedna je nizozemská, jedna japonská a tři kalifornské - a bez nich nejspolehlivější čipy prakticky nelze vyrobit. Poté se čip zapouzdří a otestuje, často v jihovýchodní Asii, načež se pošle do Číny, kde se stane součástí telefonu nebo počítače.

Pokud dojde k narušení jediné etapy výroby, ohrozí to přísun nového výpočetního výkonu pro celý svět. V době umělé inteligence často slyšíme, že data jsou novou ropou. Ve skutečnosti nás však neomezuje dostupnost dat, ale výpočetní síla. Existuje konečný počet polovodičů, jež mohou ukládat a zpracovávat data. Jejich výroba je neskutečně složitá a otřesně nákladná. Ropu lze koupit z mnoha zemí, ale výroba čipů závisí na řadě „úzkých hrdel“, jako jsou nástroje, chemikálie a software, které často vyrábí jen hrstka společností, a někdy dokonce jen jedna. Žádná jiná součást ekonomiky není tak moc závislá na tak malém počtu firem. Čipy z Tchaj-wanu každoročně představují 37 procent nového výpočetního výkonu a 44 procent všech paměťových čipů na světě vyrábějí dvě korejské společnosti.¹³ Nizozemský podnik ASML staví 100 procent strojů na extrémní ultrafialovou litografii, bez nichž nejlepší čipy prostě

vyrobit nejde. Asi 40procentní podíl organizace OPEC na světové produkci ropy oproti tomu najednou nevypadá až tak působivě.

Globální síť firem, která každý rok vyprodukuje bilion čipů na úrovni nanometrů, je triumfem na poli efektivity, zároveň se však jedná o ohromnou slabinu. Komplikace během pandemie nám jen nastínily, co by s globální ekonomikou mohlo udělat jediné nešťastně umístěné zemětřesení. Tchaj-wan leží na zlomové linii, kde ještě v roce 1999 došlo k otřesům o síle 7,3 Richterovy stupnice. Výroba se naštěstí zastavila jen na několik dní, ale je otázkou času, než Tchaj-wan zasáhne ještě silnější zemětřesení. Ničivé otřesy by mohly postihnout také Japonsko, které vyrábí 17 procent světových čipů, nebo Silicon Valley, kde dnes sice moc polovodičů přímo nevzniká, ale staví se tu klíčové stroje pro jejich výrobu, a to v závodech, které stojí na zlomu San Andreas.

Pohyby, jež dnes dodávky polovodičů ohrožují nejvíce, však nemají původ ve střetech tektonických desek, ale ve střetech velmocí. Zatímco Čína a Spojené státy bojují o nadvládu, Washington i Peking usilují o kontrolu nad budoucností výpočetní techniky – a tato budoucnost je do děsivé míry závislá na malém ostrově, který Peking považuje za svou vzbouřenou provincii a který se Amerika zavázala bránit silou.

Vzájemná propojenost čipového průmyslu v USA, Číně a na Tchaj-wanu je nesmírně komplexní. Dokonale to ilustruje člověk, který TSMC – společnost, jež do roku 2020 považovala za své dva největší zákazníky americký Apple a čínský Huawei – založil. Morris Chang se narodil v kontinentální Číně, za druhé světové války vyrůstal v Hongkongu, vzdělání získal na Harvardově univerzitě, MIT a na Stanfordově univerzitě. Jako zaměstnanec firmy Texas Instruments v Dallasu pomáhal vybudovat americký čipový průmysl v jeho začátcích, měl prověrku na stupeň přísně tajné,¹⁴ aby mohl vyvíjet elektroniku pro americkou armádu, a udělal z Tchaj-wanu centrum světové výroby polovodičů. Někteří zahraničněpolitici stratégové v Pekingu a Washingtonu sní o oddělení technologických odvětví obou zemí, ale mimořádně efektivní mezinárodní síť designerů čipů, dodavatelů chemikálií a výrobců obráběcích strojů, kterou lidé jako Chang pomohli vybudovat, nelze snadno rozvázat.

To ovšem platí, pouze pokud nedojde k nějaké katastrofě. Peking opakovaně odmítl vyloučit možnost, že provede invazi na Tchaj-wan, aby jej „znovusjednotil“ s kontinentální Čínou. Aby se však kvůli polovodičům světovou ekonomikou prohnala tlaková vlna, postačí i něco méně dramatického než obojživelný útok. I částečná čínská vojenská blokáda by odstartovala ohromné problémy. Jediný raketový útok na nejmodernější zařízení společnosti TSMC na výrobu čipů by mohl snadno způsobit škody za stovky miliard dolarů, pokud by se sečetla zpoždění ve výrobě telefonů, datových center, automobilů, telekomunikačních sítí a dalších technologií.

Že se světová ekonomika stala rukojmím v jednom z nejnebezpečnějších politických sporů, vypadá jako velmi závažný problém. Vysoká koncentrace výroby moderních čipů na Tchaj-wanu, v Jižní Koreji a na dalších místech východní Asie však není náhodná. Vzdálené dodavatelské řetězce, na které se dnes spoléháme, vytvořila řada promyšlených rozhodnutí vládních úředníků a manažerů firem. Výrobce čipů, kteří hledali dělníky do továren, přilákala do Asie velká nabídka levné pracovní síly. Vlády a korporace v regionu využívaly offshorové montovny k tomu, aby se seznámily s pokročilejšími technologiemi, a nakonec si je osvojily. Washingtonští odborníci na zahraniční politiku přijali složité dodavatelské řetězce jako nástroj pro provázání Asie se světem vedeným Amerikou. Neúprosná poptávka kapitalismu po ekonomické efektivitě zapříčinila konstantní tlak na snižování cen a na konsolidaci firem. Stabilní tempo technologických inovací v jádru Moorova zákona vyžadovalo stále komplexnější materiály, stroje a procesy, které bylo možné dodávat a financovat pouze skrze globální trhy. Naše obrovská poptávka po výpočetním výkonu navíc stále roste.

Tato kniha vznikla z bádání v archivech na třech kontinentech od Tchaj-peje po Moskvu a z více než stovky rozhovorů s vědci, inženýry, generálními řediteli a vládními činiteli. Její tezí je, že polovodiče stvořily svět, ve kterém žijeme, a určují podobu mezinárodní politiky, strukturu světové ekonomiky a rovnováhu vojenských sil. Čip je sice to nejmodernější zařízení na světě, má však složitou a spornou historii. Jeho vývoj ovlivnily nejen korporace a spotřebitelé, ale také ambiciózní vlády a jejich vojenské cíle. Abychom pochopili, jak se stalo, že náš svět závisí na trilionech tranzistorů a na malé skupince nenahraditelných společností, musíme se nejprve podívat na počátky křemíkového věku.

ČÁST I.

ČIPY Z OBDOBÍ STUDENÉ VÁLKY

OD OCELI KE KŘEMÍKU

Japonští vojáci popisovali druhou světovou válku jako „ocelový tajfun“. Stejně to muselo připadat i Akio Moritovi, pilnému mladému inženýrovi z rodiny úspěšných obchodníků se saké.¹ Morita se jen tak tak vyhnul první linii, jelikož byl umístěn do japonské laboratoře námořního strojírenství. Tajfun z oceli však zasáhl i jeho vlast, když americké letouny B-29 Superfortress bombardovaly Japonsko a zničily většinu Tokia a další velká města. Zkázu ještě zhoršila americká blokáda, kvůli níž mnoho lidí hladovělo a která zemi donutila k zoufalým činům. Moritovi bratři se na konci války účastnili výcviku pilotů kamikadze.

Za Východočínským mořem vyrůstal Morris Chang za doprovodu zvuků střelby a poplašných sirén, které varovaly před leteckými útoky.² Chang své teenagerské roky strávil na útěku před japonskou armádou, která se na Čínu vrhla. Přestěhoval se do Kuang-čou, pak do tehdejší britské kolonie Hongkongu, do Čchung-čchingu, který byl za války čínským hlavním městem, a když byli Japonci poraženi, vrátil se do Šanghaje. Válka však ve skutečnosti neskončila, protože komunistické gerily obnovily svůj boj proti čínské vládě a na Šanghaj brzy začala pochodovat Mao Ce-tungova vojska. Morris Chang musel z Hongkongu utéct podruhé a znovu se z něj stal uprchlík.

Budapešť se sice nachází na druhé straně světa, ale Andy Grove zažil stejný ocelový tajfun jako ten, který se prohnal Asií.³ Andy (tehdy se jmenoval András Gróf) přežil několik invazí do Budapešti. Maďarská extrémně pravicová vláda považovala Židy, jako byli Groveovi, za občany druhé kategorie, ale když v Evropě vypukla válka, Andyho otec dostal povolávací rozkaz a musel jet bojovat proti Sovětskému svazu po boku nacistických spojenců. Po bitvě u Stalingradu byl označen za nezhvěstného. V roce 1944 vtrhli nacisté do Maďarska, na území údajně spojenecké země. Do Budapešti najely kolony tanků a Němci ohlásili, že Židy včetně Groveových pošlou do vyhlazovacích táborů. O několik měsíců později slyšel Andy, stále v dětském věku, dunění dělostřelectva znovu – to když do maďarského hlavního města napochodovali vojáci Rudé armády, kteří zemi „osvobodili“, znásilnili Groveovu matku a do čela státu dosadili brutální loutkový režim.

Nekonečné kolony tanků, vlny letadel, tisíce tun bomb shozených z nebe, konvoje lodí, jež přivázely nákladní auta, bojová vozidla, ropné produkty, lokomotivy, vagony, dělostřelectvo, munici, uhlí a ocel. Druhá světová válka byla průmyslovým opotřebovacím konfliktem – Spojené státy to tak chtěly, protože věděly, že v takové válce zvítězí. Amerika transformovala svou výrobní sílu do síly vojenské a ekonomové tamního výboru pro válečnou výrobu ve Washingtonu měřili úspěch podle objemu mědi a železa, pryže a ropy nebo hliníku a cínu.

Spojené státy vyrobily víc tanků, lodí a letadel než všechny země Osy dohromady, dělostřelectva a kulometů dokonce dvakrát víc. Z amerických přístavů přes Atlantický a Tichý oceán proudily konvoje zboží, které zásobovaly klíčovým materiálem Británii, Sovětský svaz, Čínu a další spojence. Válku vedli vojáci u Stalingradu a námořníci u Midway. Vojenskou sílu však vyráběly americké loděnice Kaiser a montážní linky v River Rouge.

V roce 1945 v rozhlase po celém světě zaznělo, že válka je konečně u konce. Mladý inženýr Akio Morita si kousek za Tokiem k poslechu kapitulčního projevu císaře Hirohita oblékl slavnostní uniformu. Projev však poslouchal raději sám než ve společnosti dalších důstojníků námořnictva, aby ho nikdo nenutil spáchat rituální sebevraždu.⁴ Na druhé straně Východočínského moře oslavil Morris Chang japonskou porážku a konec války rychlým návratem k pohodovému mladickému životu – s kamarády chodili do kina, hráli tenis a karty.⁵ Andy Grove tou dobou v Maďarsku vylezl se svou matkou opatrně z krytu, ale jeho rodina za sovětské okupace trpěla stejně jako během války.

Výsledek druhé světové války závisel na průmyslové výrobě, ale už tehdy bylo jasné, že vojenská síla se vlivem nových technologií mění. Velmoci vyráběly tisíce tanků a letadel, stejně tak ale stavěly výzkumné laboratoře, kde vznikaly nová zařízení jako rakety a radary. Dvě atomové bomby, jež zničily Hirošimu a Nagasaki, odstartovaly spekulace o tom, že éru uhlí a oceli možná nahradí doba atomová.

Morris Chang a Andy Grove chodili v roce 1945 do školy a byli příliš mladí, než aby vážně uvažovali nad technologiemi nebo politikou. Akio Moritovi ale bylo něco přes dvacet a v posledních měsících války vyvíjel tepelně naváděné rakety.⁶ Japonsko mělo k funkčním řízeným střelám stále daleko, ale tento projekt umožnil Moritovi nahlédnout do budoucnosti. Pomalu si dokázal představit, že války nebudou vyhrávat nýtovači na montážních linkách, ale zbraně, které zvládnou automaticky identifikovat cíle a manévrovat. Tato myšlenka se zdála jako sci-fi, Morita měl však matnou představu o novém vývoji v oblasti elektronických výpočtů, který by mohl umožnit strojům „myslet“ pomocí matematických operací jako sčítání, násobení nebo odmocňování.

Nebylo to samozřejmě nic nového. Lidé si počítáním na prstech pomáhali už od doby, kdy se homo sapiens poprvé naučil počítat. Staří Babyloňané vynalezli

pro výpočty s velkými čísly abakus, a lidé tak celá staletí násobili a dělili za pomoci dřevěných korálků, které posouvali ze strany na stranu. Na přelomu 19. a 20. století vyžadoval velký nárůst byrokracie ve státní správě a podnikání armády lidských „počítačů“,⁷ tedy pracovníků vyzbrojených perem, papírem a příležitostně jednoduchými mechanickými kalkulačkami, které uměly sčítat, odčítat, násobit, dělit a počítat základní odmocniny.

Tyto živé počítače dokázaly zpracovávat výplatní pásky, sledovat tržby, shromažďovat výsledky sčítání lidu a procházet údaje o požárech a suchu, jež byly potřebné pro stanovení ceny pojistných smluv. Americká vládní správa postupu prací, jež měla za cíl zaměstnat co nejvíc nezaměstnaných úředníků, přišla v době velké hospodářské krize s projektem na přípravu matematických tabulek. Několik stovek lidských „počítačů“ sedělo u stolů v kancelářské budově na Manhattanu a zpracovávalo tabulky logaritmů a exponenciálních funkcí. V rámci tohoto projektu vyšlo osmadvacet svazků s výsledky komplexních funkcí, mezi něž patřil například titul *Table of Reciprocals of the Integers from 100,000 through 200,009* (Tabulky převrácených hodnot celých čísel od 100 000 do 200 009) se 201 stránkami plnými čísel.

Organizované skupiny počtářů ukázaly slibný potenciál výpočetního výkonu, ale také omezení vyplývající z toho, že výpočty prováděly lidské mozky. Lidé pracovali pomalu i s pomocí mechanických kalkulaček. Když někdo chtěl použít výsledky z tabulek, musel nejprve prolistovat stránky jednoho z osmadvaceti svazků, dokud nenašel výsledek konkrétního logaritmu nebo exponentu. Čím více výpočtů bylo potřeba, tím více stránek musel člověk projít.

Poptávka po výpočtech zatím stále rostla. Do projektů na vývoj lepších mechanických počítačů proudily peníze i před druhou světovou válkou, konflikt však hon za výkonem ještě urychlil. Vzdušné síly několika zemí vyvinuly mechanická mířidla, jež letcům pomáhala zasahovat cíle. Posádky bombardérů zadávaly rychlost větru a výšku otočnými knoflíky, které pohybovaly kovovými pákami, jež následně nastavovaly skleněná zrcadla. Toto zařízení „vypočítávalo“ nadmořské výšky a úhly přesněji, než by to dokázal jakýkoliv pilot, a nastavovalo zaměřovač, když se letadlo blížilo k cíli. Takový systém měl však řadu jasných nedostatků. Mířidla brala v potaz jen několik vstupních hodnot a poskytovala pouze jeden výstup – kdy shodit bombu. V dokonalých zkušebních podmínkách byly americké zaměřovače přesnější než piloti. Při nasazení nad Německem však dopadlo do tří set metrů od cíle jen 20 procent pum.⁸ Válku nerozhodla otočná kolečka mechanických počítačů, která se municí (obvykle bez úspěchu) pokoušela navádět na cíl, ale množství shozených bomb a vypálených dělostřeleckých granátů.

Větší přesnost vyžadovala víc výpočtů. Inženýři postupně začali nahrazovat mechanické převody elektrickým nábojem. První elektrické počítače používaly

elektronku: skleněnou trubici s kovovým vláknem ve vakuu, která se podobala žárovce. Elektrický proud procházející trubicí bylo možné zapínat a vypínat, což plnilo podobnou funkci jako kuličky na počítadle. Zapnutá trubice byla zakódovaná jako 1, zatímco vypnutá jako 0. Těmito dvěma číslicemi lze ve dvojkové soustavě vytvořit libovolné číslo – a proto teoreticky mohou sloužit ke mnoha typům výpočtů.

Elektronky navíc přinesly možnost digitální počítače přeprogramovat. Mechanické převody jako ty v zaměřovačích dokázaly provést jen jeden typ výpočtu, protože každý knoflík byl fyzicky připevněný k páčkám a převodům. Kuličky na počítadle se zase po dřevěných tyčkách mohly pohybovat pouze tam a zpátky. Spoje mezi elektronkami šlo oproti tomu přeorganizovat, a tak mohly provádět různé výpočty.

Tento vynález znamenal ve výpočetní technice skok kupředu. Respektive by jím mohl být, kdyby neexistovaly můry. Jelikož elektronky svítily jako žárovky, přitahovaly hmyz, který z nich bylo potřeba pravidelně odstraňovat.⁹ Podobně jako žárovky elektronky také často vyhořely. Tehdy nejmodernější počítač ENIAC, který v roce 1945 sestrojili pro americkou armádu na Pensylvánské univerzitě, aby počítal trajektorie dělostřeleckých granátů, měl elektronek hned osmnáct tisíc.¹⁰ Jedna se porouchala v průměru každé dva dny. Když k tomu došlo, stroj se zastavil a technici museli porouchanou součástku honem najít a vyměnit. ENIAC dokázal za vteřinu znásobit stovky čísel a byl rychlejší než všichni matematici. Sestával však z osmnácti tisíc trubic o velikosti pěti, takže zabral celou místnost. Ukázalo se, že elektronky jsou příliš velké, pomalé a nespolehlivé. Dokud budou můrami prolezlé počítače dosahovat tak obrovských rozměrů, budou užitečné jen pro specifické užití jako dešifrování kódů. Pokud ovšem vědci neobjeví nějaký spínač, který bude menší, rychlejší a levnější.

VYPÍNAČ

William Shockley se už dlouho domníval, že lepší „spínač“ půjde najít pouze za pomoci materiálu zvaného polovodič.¹ Shockley, v Londýně narozený syn světoběžnického důlního inženýra, vyrostl jako jedináček mezi ovocnými stromy v ospalém kalifornském městečku Palo Alto. Byl skálopevně přesvědčený, že je lepší než všichni okolo, což také dával jasně najevo. Studoval na jihokaliifornském Caltechu, doktorát z fyziky získal na MIT, načež začal pracovat ve firmě Bell Labs v New Jersey, která byla tehdy jedním z nejlepších center vědy a technologií na světě. Kolegové Shockleyho nemohli vystát, ale zároveň uznávali, že je to geniální teoretický fyzik. Měl tak dokonalou intuici, že jeden z Shockleyho spolupracovníků poznamenal, že to vypadá, jako by Shockley skutečně *viděl* elektrony, které se pohybují po kovech nebo spojují atomy.²

Polovodiče, Shockleyho specializace, jsou unikátním typem materiálu. Většina látek elektrický proud buď volně vede (třeba měděný drát), nebo ho blokuje (sklo). S polovodiči se to má jinak. Polovodivé materiály jako křemík nebo germanium se samy o sobě chovají jako sklo, takže nevedou téměř žádný proud. Když se k nim však přidají určité příměsi a připojí se ke zdroji napětí, elektrina může začít proudit. Přidá-li se ke křemíku či germaniu fosfor nebo antimon, materiálem začne proudit negativní náboj.

Polovodivé materiály „nadotované“ dalšími prvky představovaly příležitost pro vznik nových zařízení, která by uměla vytvářet a usměrňovat elektrický proud. Ovládnutí toku elektronů v křemíku či germaniu však bylo vzdáleným snem, jelikož elektrické vlastnosti těchto prvků byly stále nevysvětlitelnou záhadou. Ani všechny mozky v Bell Labs nedokázaly až do konce čtyřicátých let 20. století vysvětlit, proč se desky polovodivých materiálů chovají tak nepochopitelně. V roce 1945 Shockley poprvé navrhl takzvaný „polovodičový ventil“, když si do svého zápisníku nakreslil kus křemíku připojený k devadesátivoltové baterii.³ Zformuloval hypotézu, že polovodivý materiál jako křemík může za přítomnosti elektrického pole vytáhnout „volné elektrony“ uložené uvnitř materiálu tak, aby se následně shlukovaly poblíž okraje polovodiče. Pokud elektrické pole přitáhne dostatek elektronů, z okraje polovodiče se stane vodič podobný třeba kovům, které zpravidla mívají volných elektronů velké množství. Kdyby k tomu došlo, z materiálu, jímž dříve elektrický proud neprotékal, by se stal vodič. Shockley zanedlouho takový přístroj sestavil. Očekával, že podle přítomnosti elektrického

pole v blízkosti kousku křemíku by se destička mohla chovat jako ventil, který by otevíral a uzavíral tok elektronů. Když však tento pokus provedl, nezaznamenal žádnou změnu. „Nic měřitelného,“ popisoval. „Docela záhadné.“ Materiálem ve skutečnosti elektrina proudila, ale jednoduché nástroje dostupné ve čtyřicátých letech zkrátka nebyly dost přesné, aby slaboučký proud zaznamenaly.

O dva roky později vymysleli dva Shockleyho kolegové z Bell Labs podobný experiment s jiným zařízením. Zatímco Shockley byl namyšlený a nepříjemný, jeho kolegové Walter Brattain, brilantní experimentální fyzik z ranče na washingtonském venkově, a John Bardeen, vědec se vzděláním z Princetonu, který se později stal jediným nositelem dvou Nobelových cen za fyziku, se naopak chovali skromně a slušně. Brattain a Bardeen se inspirovali Shockleyho teorií a sestrojili zařízení ze dvou zlatých vláken připojených drátky ke zdroji energie a ke kousku kovu, který umístili do blízkosti germania, přičemž každé vlákno se dotýkalo germania ve vzdálenosti menší než jeden milimetr od druhého. Když odpoledne 16. prosince 1947 v ústředí Bellových laboratoří Bardeen a Brattain zapnuli napájení, dokázali kontrolovat proud, který germaniem procházel.⁴ Shockleyho teorie o polovodivých materiálech se v tu chvíli potvrdily.

Společnost AT&T, jež Bell Labs vlastnila, se soustředila na telefony, ne na počítače, a tak užitečnost tohoto přístroje – který brzy získal název „tranzistor“ – viděla hlavně ve schopnosti zesílit signál, který v její rozsáhlé síti přenášel telefonáty. Protože tranzistory dokázaly zesilovat proud, záhy se ukázalo, že budou užitečné v zařízeních, jako jsou naslouchátka a rádia, a nahradí méně spolehlivé elektronky, které se také používaly k zesilování signálu. V Bell Labs zanedlouho začali vyřizovat žádost o patent.

Shockleyho rozzuřilo, že jeho spolupracovníci provedli experiment, který potvrdil jeho teorie, a byl odhodlaný je překonat. Přes Vánoce se na dva týdny zavřel do hotelu v Chicagu a začal vymýšlet další struktury tranzistoru, jež stály na jeho hlubokých znalostech fyziky polovodičů. V lednu 1948 už měl představu o novém typu tranzistoru, který se skládal ze tří kusů polovodivého materiálu. Vnější dva měly mít nadbytek elektronů a ten třetí, který byl vmáčknutý mezi ně, měl mít elektronů nedostatek. Pokud byl do prostřední vrstvy tohoto „sendviče“ přiveden slabý proud, celým zařízením začal protékat proud mnohem silnější. Toto zesílení slabého proudu na silnější fungovalo na stejném principu, jaký předvedli na svém tranzistoru Brattain a Bardeen. Shockleyho však napadala další užití, například jako „polovodičový ventil“, o němž uvažoval dříve. Větší proud by se mohl zapínat a vypínat pomocí malého proudu, který prochází středem třídielného tranzistorového sendviče. Zapnout, vypnout. Zapnout, vypnout. Shockley vymyslel spínač.⁵

Když firma Bell Labs v červnu 1948 uspořádala tiskovou konferenci, aby oznámila, že její vědci vynalezli tranzistor, nebylo na první pohled jasné, čím si

destičky z germania připojené k elektřině zasloužily tak speciální událost. Deník *The New York Times* zprávu schoval až na stránku 46. Časopis *Time* se zachoval lépe a o vynálezu informoval titulkem „Little Brain Cell“ (Malá mozková buňka). Dokonce ani Shockley, který nikdy nepodceňoval svou důležitost, si nedokázal představit, že brzy budou tisíce, miliony a miliardy těchto tranzistorů použity v mikroskopickém měřítku a že při výpočtech nahradí lidský mozek.⁶

NOYCE, KILBY A INTEGROVANÝ OBVOD

Tranzistor mohl elektronky nahradit pouze za předpokladu, že se ho podaří zjednodušit a prodávat ve velkém. Teorie a nové objevy znamenaly jen první krok, další výzvou bylo, jak takové tranzistory vyrábět po tisících. Brattaina a Bardeena podnikání ani sériová výroba nezajímaly. Byli to především vědci, a když získali Nobelovu cenu, jejich kariéry pokračovaly v akademické sféře, kde učili a prováděli další experimenty. Zato Shockleyho ambice stále rostly. Chtěl získat slávu a zbohatnout. Přátelům vyprávěl o svém snu, že uvidí své jméno nejen v odborných publikacích jako *Physical Review*, ale i na stránkách deníku *The Wall Street Journal*.¹ V roce 1955 založil společnost Shockley Semiconductor se sídlem na předměstí San Francisca jménem Mountain View, jež leží hned vedle města Palo Alto, kde stále žila jeho stárnoucí matka.

Shockley chtěl vyrábět nejlepší tranzistory na světě. Umožnila mu to firma AT&T coby vlastník Bell Labs a patentu. Jiným firmám nabídla licenci na výrobu tohoto zařízení za 25 000 dolarů,² což vzhledem k tomu, že se jednalo o nejvyspělejší technologii v oblasti elektrotechniky, byla skvělá koupě. Shockley předpokládal, že po tranzistorech bude poptávka minimálně kvůli výměně elektronek v již existujících strojích. Potenciální velikost trhu však nebyla jasná. Všichni se shodovali, že tranzistory jsou chytrou technologií založenou na těch nejpokročilejších fyzikálních poznatcích, ale že se uchytí, pouze pokud budou v něčem lepší než elektronky nebo pokud je půjde vyrábět levněji. Shockley za své teorie o polovodičích zanedlouho získal Nobelovu cenu, nicméně otázka, jak udělat tranzistory praktické a užitečné, už nepatřila do oblasti teoretické fyziky, ale vyžadovala spíš odpověď inženýrů.

Tranzistory brzy nahradily elektronky v počítačích, ale propojování tisíců tranzistorů vyústilo v nepřehlednou a složitou džungli z drátů. Jack Kilby, inženýr ve společnosti Texas Instruments, hledal ve své texaské laboratoři po celé léto roku 1958 způsob, jak tuto změř, jež byla pro systémy s tranzistory nezbytná, zjednodušit.³ Kilby byl tichý, kolegiální, zvědavý a nenápadným způsobem geniální. „Nikdy na nás nekladl velké nároky,“ vzpomíná jeden jeho spolupracovník. „Věděli jsme, co by se podle něj mělo stát, a pak jsme udělali úplně všechno pro to,

aby se to podařilo.“ Další kolega, který s Kilbym pravidelně a s oblibou obědval grilované maso, o něm řekl, že to je „nejmilejší člověk, jakého kdy potkáte“.

Kilbyho první zaměstnavatel, firma Centralab z Milwaukee, koupil licenci od AT&T,⁴ a Kilby se tak stal jedním z prvních lidí mimo Bell Labs, kteří tranzistor používali. V roce 1958 odešel z Centralabu do oddělení tranzistorů v dallaské společnosti Texas Instruments (TI). Ta původně vznikla, aby vyráběla zařízení, která pomocí seismických vln pomáhala těžářům rozhodnout, kam umístit vrty. Za druhé světové války firmu do svých služeb povolalo americké námořnictvo, pro které vyráběla sonary na sledování pohybu nepřátelských ponorek.⁵ Manažeri TI si po válce uvědomili, že jejich znalosti v oblasti elektrotechniky by se mohly hodit i v jiných vojenských systémech, a proto najali Kilbyho a další inženýry, aby taková zařízení vyrobili.

Kilby do Dallasu dorazil v červencovém období dovolených, ale sám žádné volno nedostal, a tak měl laboratoř několik týdnů sám pro sebe. Když neměl co dělat, přemýšlel, jak snížit počet drátů, které byly potřeba na propojení tranzistorů. Napadlo ho, že místo aby se tranzistory vyráběly jednotlivě na samostatných kusech křemíku nebo germania, dalo by se několik komponentů umístit na stejný kus polovodivého materiálu.⁶ Když se jeho kolegové vrátili z letní dovolené, došlo jim, že Kilbyho nápad je revoluční. Na kousek křemíku nebo germania by se mohlo vejít více tranzistorů najednou. Kilby svůj vynález nazval „integrovaný obvod“, ale neformálně se mu říkalo *chip*, což v angličtině znamená „odštěpek“, protože integrované obvody se vyráběly z kousku křemíku odděleného z kruhového křemíkového plátku.

Přibližně o rok dříve oznámila v kalifornském Palo Altu skupina osmi inženýrů zaměstnaných v laboratoři Williama Shockleyho svému šefovi, nositeli Nobelovy ceny, že dávají výpověď. Shockley uměl rozpoznat talent, ale byl to ořesný manažer. Liboval si ve sporech a vytvářel toxickou atmosféru, jež nadané mladé inženýry odpuzovala. Těchto osm kolegů opustilo Shockley Semiconductor a rozhodlo se – s počáteční investicí od jednoho milionáře z východního pobřeží – založit vlastní firmu Fairchild Semiconductor.⁷

Panuje všeobecná shoda, že Silicon Valley založilo právě těchto osm zběhů z Shockleyho laboratoře. Eugene Kleiner, jeden z nich, později vybudoval společnost Kleiner Perkins, jež patří mezi nejmocnější firmy v oblasti rizikového kapitálu na světě. Gordon Moore, který měl ve Fairchildu na starosti výzkum a vývoj, později zformuloval Moorův zákon, jenž popisuje exponenciální růst výpočetního výkonu. Nejdůležitější byl Bob Noyce, vůdce „osmičky zrádců“, který měl charisma, vizionářské nadšení pro mikroelektroniku a intuitivně chápal, jaký technický pokrok je nutný, aby tranzistory mohly být malé, levné a spolehlivé. Najít pro nové vynálezy komerční využití bylo přesně to, co startup jako Fairchild potřeboval k úspěchu – a co potřeboval čipový průmysl, aby se rozjel.

Když firma Fairchild Semiconductor vznikla, vědci už vesměs chápali, jak tranzistory fungují, obrovský problém ale byl najít spolehlivý výrobní proces. První komerční tranzistory se vyráběly z bloku germania, na který se vrstvily různé materiály, jejichž výsledný tvar připomínal mesu, tedy stolovou horu, jako z arizonské pouště. Na část germania se nanasla kapka černého vosku a kousek, který na sobě vosk neměl, se vyleptal pomocí chemikálií. Vosk se poté odstranil a na germaniu zůstaly tvary podobné mesám.

Nevýhodou této struktury však bylo, že se na tranzistoru usazoval prach a jiné nečistoty, které reagovaly s materiály na jeho povrchu. Noyceův kolega Jean Hoerni, švýcarský fyzik a vášnivý horolezec, si uvědomil, že stolové hory by nebyly nutné, pokud by se celý tranzistor nenacházel na povrchu germania, ale přímo v něm. Přišel proto s novou metodou, podle které by se všechny části tranzistoru vyráběly tak, že se na desku křemíku nanese ochranná vrstva oxidu křemičitého, následně se vyleptají otvory na místech, kde to je potřeba, a přidají se další materiály. Ochranné vrstvy zabrání vystavení materiálů vzduchu a nečistotám, které by mohly způsobit závady. Z hlediska spolehlivosti to byl významný pokrok.

O několik měsíců později si Noyce uvědomil, že by se pomocí Hoerniovy „planární metody“⁸ dalo na stejném kusu křemíku vyrobit více tranzistorů. Zatímco Kilby – aniž by to Noyce tušil – sestrojil na germaniu tranzistor se strukturou stolových hor, který pak propojoval dráty, Noyce využil Hoerniův planární proces a vyrobil několik tranzistorů na jediném čipu. Součástí planárního procesu je ochranná vrstva oxidu křemičitého, a tak mohl Noyce své „dráty“ umístit přímo na čip – na jeho povrch umístil kovové spojnice, jež mezi jednotlivými tranzistory rozváděly elektrický proud. Noyce, stejně jako Kilby, vynalezl integrovaný obvod, tedy několik elektrických komponent na jednom kusu polovodičového materiálu. Těmto integrovaným obvodům se už brzy začalo říkat „čipy“.

Noyce, Moore a jejich kolegové z Fairchild Semiconductor věděli, že jejich integrované obvody budou výrazně spolehlivější než spletené drátů, na nichž fungovala ostatní elektrická zařízení. Zdálo se, že jejich planární design půjde miniaturizovat mnohem snáz než standardní mesa tranzistory se strukturou stolových hor. Menší obvody budou vyžadovat méně elektřiny a Noyceovi s Moorem začalo docházet, že miniaturizace a energetická účinnost společně tvoří mocnou kombinaci – menší tranzistory s nižší spotřebou energie by zajistily, že se pro integrované obvody najdou nové způsoby využití. Zpočátku však Noyceův integrovaný obvod stál padesátkrát více než jednodušší zařízení se samostatnými součástkami propojenými dráty.⁹ Všichni se shodli, že Noyceův vynález je chytrý, ne-li geniální – už jen stačilo, aby po něm vznikla poptávka.

RAKETOVÝ START

Tři dny poté, co Noyce a Moore založili společnost Fairchild Semiconductor, se jim přesně ve 20:55 nad hlavami přes kalifornskou noční oblohu prohnala odpověď na otázku, kdo by za integrované obvody mohl být ochotný zaplatit. *Sputnik*, první satelit na světě vypuštěný Sovětským svazem, obíhal kolem planety ze západu na východ rychlostí skoro 29 000 kilometrů v hodině. Obavy Američanů, že tento satelit dává Rusům strategickou výhodu, se odrazily i v titulku deníku *San Francisco Chronicle*, kde stálo: „Nad planetou krouží ruský ‚měsíc‘.“¹ Sověti čtyři roky po vypuštění Sputniku šokovali znovu, když se kosmonaut Jurij Gagarin stal prvním člověkem, který vzlétl do vesmíru.

Sovětský vesmírný program způsobil napříč Amerikou krizi důvěry.² Kontrola nad kosmem by měla vážné vojenské následky. Spojené státy se považovaly za světovou vědeckou supervelmoc, ale najednou se zdálo, že jsou pozadu. Washington spustil krizový plán, aby sovětské raketové programy dohnal, a prezident John F. Kennedy oznámil, že USA pošlou člověka na Měsíc. Bob Noyce měl náhle trh pro své integrované obvody – rakety.

Jako první si velké množství Noyceových čipů objednala NASA, která v šedesátých letech dostala obrovský rozpočet na cestu na Měsíc. Amerika se začala soustřeďovat na přistání na Měsíci a inženýři z MIT Instrumentation Lab dostali od NASA za úkol navrhnout pro vesmírnou loď *Apollo* naváděcí počítač. Bylo jisté, že bude jedním z nejkomplicovanějších, jaké dosud vznikly. Všichni se shodli, že tranzistorové počítače jsou mnohem lepší než jejich elektronkové protějšky, které za druhé světové války luštily šifry a počítaly balistické trajektorie. Dokáže však jakékoliv zařízení tohoto typu navigovat kosmické plavidlo až na Měsíc? Jeden inženýr z MIT vypočítal, že aby počítač splnil požadavky mise *Apollo*, musel by být velký asi jako lednička a spotřeboval by více energie, než kolik podle odhadů celá vesmírná loď vyrobí.³

Pracoviště MIT Instrumentation Lab obdrželo první integrovaný obvod z dílny Texas Instruments v roce 1959, tedy jen rok poté, co jej Jack Kilby vynalezl. MIT objednalo čtyřiašedesát čipů po tisíci dolarech, aby je otestovalo v rámci raketového programu amerického námořnictva. Tým MIT nakonec ve vyvíjené raketě tento čip nepoužil, ale integrované obvody považoval za velmi zajímavé. Firma Fairchild tou dobou uváděla na trh své čipy s názvem „Micrologic“. „Nakup těch