

A single-atom transistor

Martin Fuechsle¹, Jill A. Miwa¹, Suddhasatta Mahapatra¹, Hoon Ryu², Sunhee Lee³,
Oliver Warschkow⁴, Lloyd C. L. Hollenberg⁵, Gerhard Klimeck³ and Michelle Y. Simmons^{1*}

news & views

NANOELECTRONICS

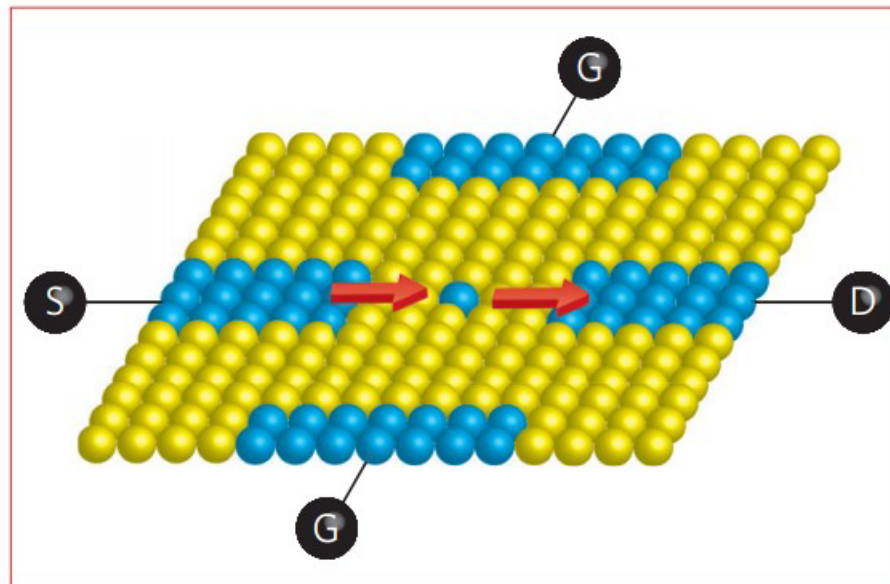
Transistors arrive at the atomic limit

A single-atom transistor has been made by positioning a phosphorus atom between metallic electrodes, also made of phosphorus, on a silicon surface.

Gabriel P. Lansbergen

One cannot make a sample of material that is smaller than an atom: this sets a lower limit on the size of any part of a solid-state device. Even before this atomic limit is reached, however, the properties of devices containing tens or hundreds of atoms differ significantly from their large-scale counterparts, which presents an increasingly difficult challenge for the semiconductor industry. Nevertheless, silicon transistors have been relentlessly scaled down in size over recent decades, resulting in devices with gate oxides that are only several atomic layers thick and channels that are just tens of nanometres long. One of the main challenges now is caused by natural variations in the number and position of the dopant atoms in the channel, which leads to device-to-device fluctuations that are detrimental to operation¹.

But as top-down approaches to device fabrication run into these problems



Si technológia: fontos korlát, hogy az adalékoló atomok helyzetét nem tudják atomi precizitással kontrolálni

STM - H reziszt litográfia

Hidrogénnel fedett Si(001) felületről STM tűvel (+4V, 1nA) atomi precizitással deszorbeálni lehet a hidrogént.

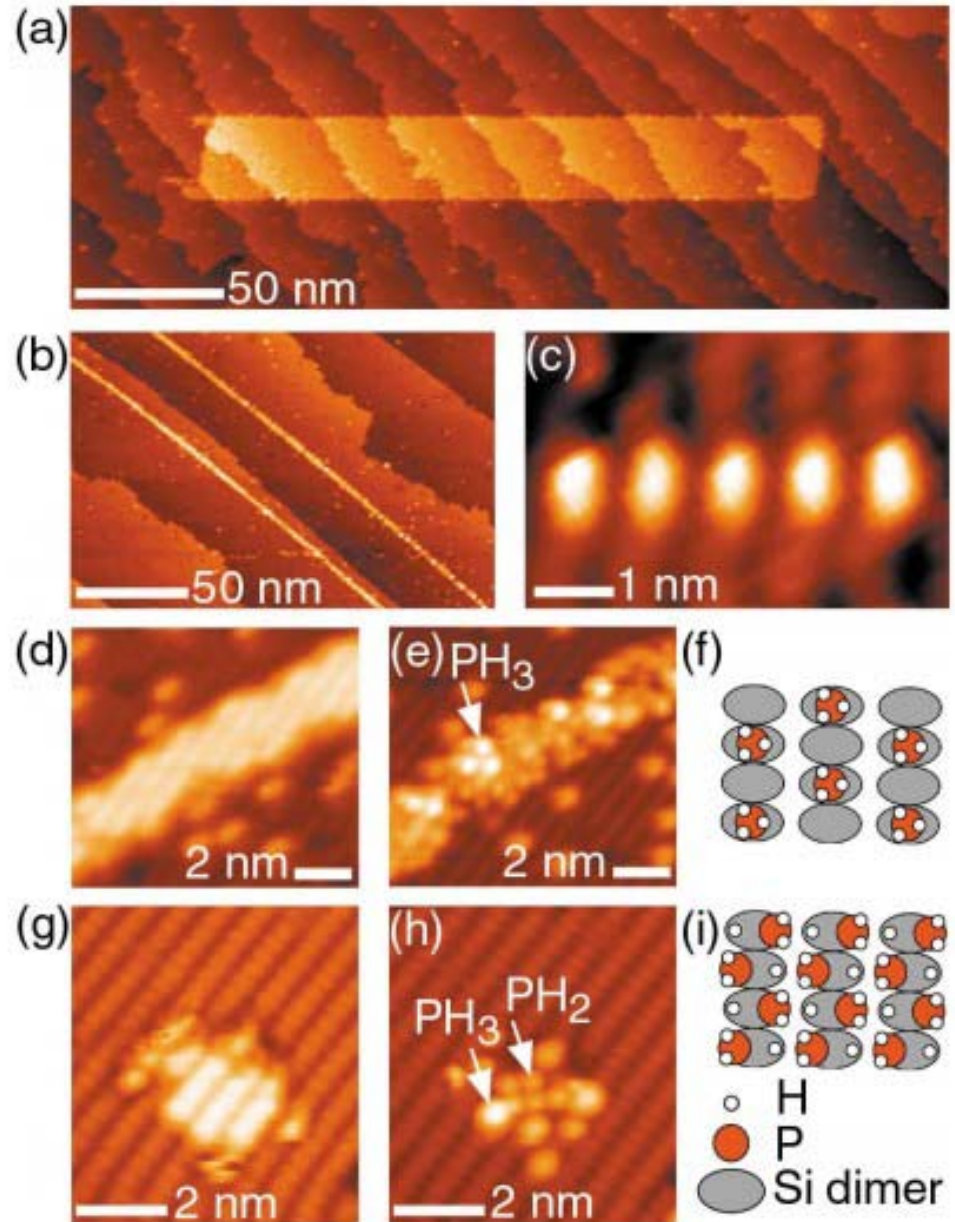
(a) 200x30nm² téglalap

(b) két párhuzamos vonal

(c) 5 db egyedi H atom eltávolítása

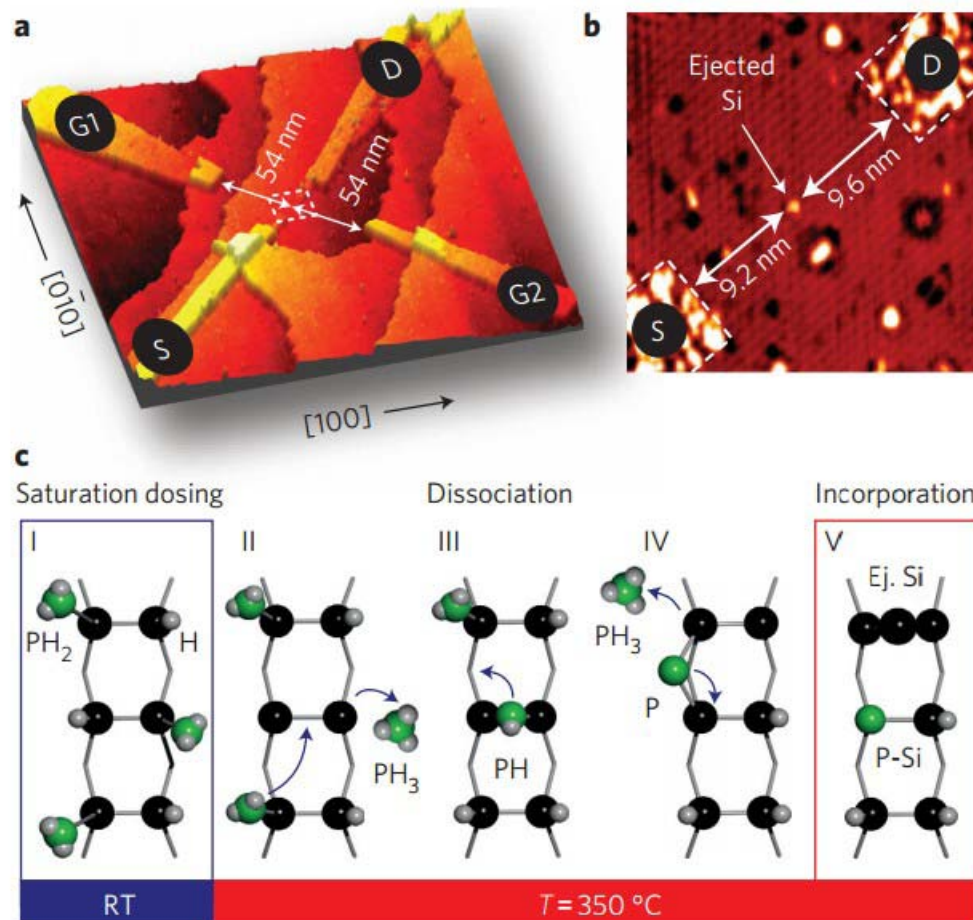
(d),(g) 2nm széles csík illetve 2nm átm. kör

(e),(h) a H eltávolítása után PH₃ molekulákat engednek a felületre, amiknek egy része PH₂ + H-ra disszociál



Egyetlen P atom beültetése +- 3.8Å pontossággal

- H reziszt litográfiával szabaddá tesznek 3x2 Si atomot (3 dimer)
- (I) PH₃ molekulák adagolásával telítődik ez a 6 site disszociált PH₂-vel és H-val (szoba hőm.)
- (II) 350 C-on először egy PH₂ + H rekombinálódik és deszorbeálódik
- (III) az üres Si site hatására egy PH₂ disszociál PH-ra és H-ra, a PH beül az előbb felszabadult Si dimerre
- (IV) még egy PH₂-H rekombináció és deszorpció + PH disszociál P-re és H-ra
- (V) P beépül az egyik szabad felületi Si atom helyére
- 350C-on a hidrogén maszk még nem deszorbeálódik



Device:

- Középen egyetlen P adalékoló atom
- Source és drain elektróda ~9.5nm távolságra
- 2 gate elektróda 54nm távolságra (azonos potenciálon)

- Az elektródák lényegesen befolyásolják a dópoló atom energiaviszonyait -> szimuláció (egyelőre gate bias nélkül)

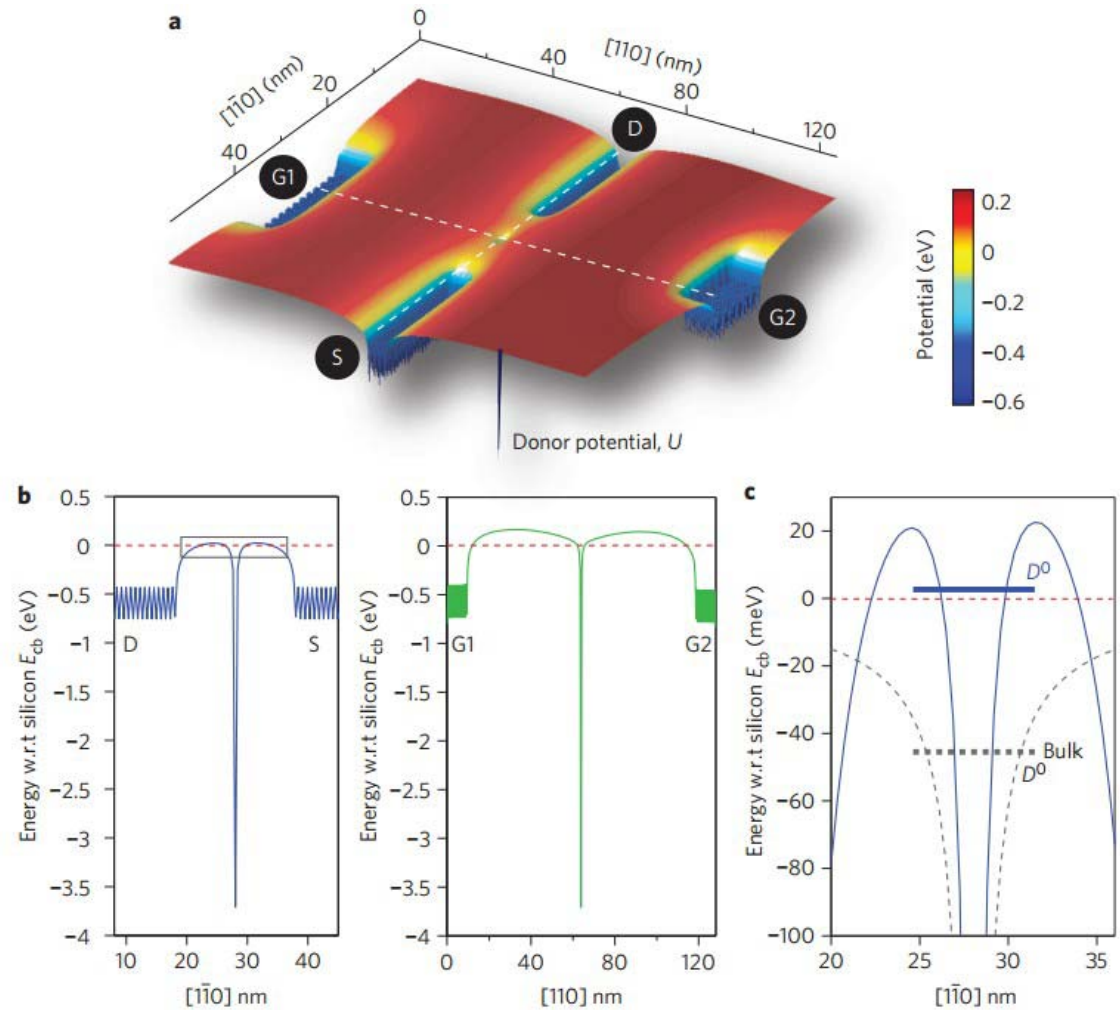
- Piros szaggatott: vezetési sáv alja (az elektródákban ez alatt van a potenciál az erős dópolás miatt)

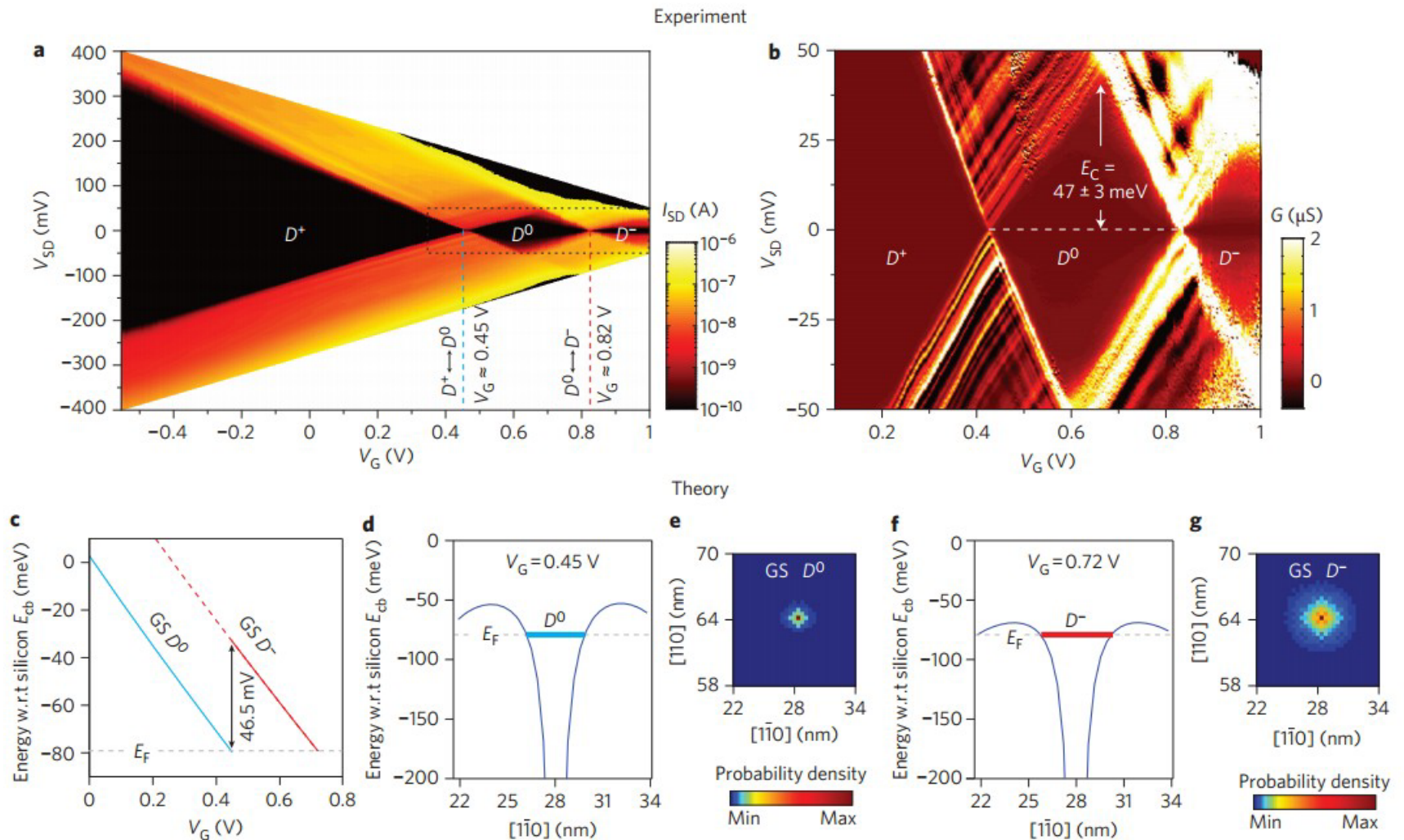
- Aszimmetrikus potenciál: S-D irányban alacsonyabb a potenciálgát mint G-G irányban

- Donor elektron állapotok számolása tight binding képben

- D+, D0, D-: 0,1,2 valencia elektron a P-atomon

- Ami mérhető: D0-D- közötti charging energia





Stabilitás diagram:

- A Coulomb gyémánt a D^+ állapotra nem zárul be \rightarrow teljesen kiürített állapot (0 valencia töltés)
- $D^+ \rightarrow D^0$ átmenet:
kísérlet: 0.45V gate, szimuláció: 0.45V gate

- D^- szint betöltése:
kísérlet: 0.82V gate, szimuláció: 0.72V gate
- $D^0 \rightarrow D^+$ charging energia:
kísérlet: 47meV, szimuláció: 46.5 meV