Ricerche · Rapporto NR-07 · 23 settembre 2026

Una porta logica fatta di luce: la cella N1 in cascata

Con i migliori componenti di silicio pubblicati, una porta ottico-elettrica guadagna, ma perde il segnale dopo poche celle e consuma circa 16.000 volte un transistor.

Gioele Chiarolanza Nadirion

Smentita

simulazione, non misura · 12 seed · 13.000 bit per catena · parametri tutti con fonte

2,13	0,01	~16.000×	2520
guadagno della cella, sopra la soglia di 2 (unico criterio superato)	qualità del segnale alla cella 10, contro 7 richiesto	energia per operazione rispetto a un transistor CMOS	configurazioni provate nella taratura dichiarata

SOMMARIO

Un cervello digitale potrebbe un giorno girare su un substrato diverso dal silicio elettronico. La prima domanda che ci siamo posti è la più semplice: si può costruire una porta logica utile per un processore fotonico con componenti di silicio già pubblicati? Una porta utile deve soddisfare i requisiti di Miller (2010): guadagno, rigenerazione dei livelli, funzionamento in cascata, tolleranza alla temperatura e un costo energetico confrontabile con l'elettronica. La cella N1 è un invertitore: un fotodiodo al germanio riceve la luce d'ingresso e carica un nodo elettrico collegato a un modulatore a microdisco (Timurdogan e colleghi, MIT, 2014), che lascia passare o blocca la luce di un laser. Con ogni parametro preso da un articolo, la cella guadagna (2,13), ma il segnale si spegne dopo poche celle, i livelli restano stabili solo in un intervallo di mezzo grado e nessuna velocità supera il banco. L'energia è di 10,6 pJ per operazione, circa 16.000 volte un transistor CMOS. **La previsione scritta prima è smentita.**

1 La domanda

Il progetto Nadirion si chiede su quale materia fisica possa girare un cervello digitale. Prima di simulare circuiti cerebrali su dispositivi fotonici (NR-08) volevamo sapere se la fotonica di silicio disponibile oggi offra almeno una porta logica che si possa mettere in cascata. È una domanda preliminare, esplorativa e a costo zero: nessun chip è stato fabbricato.

2 La cella N1

La luce d'ingresso colpisce un fotodiodo al germanio (DeRose e colleghi, Sandia, 2011) che carica un piccolo nodo elettrico. Il nodo è collegato alla giunzione di un modulatore a microdisco: la tensione sposta la risonanza del disco, che fa passare o blocca la luce di un laser su una guida d'onda. Così la luce comanda la luce, e l'uscita è l'inverso dell'ingresso. Il guadagno lo paga il laser, come l'alimentazione paga quello di un transistor.

3 Metodo

1. **Criteri scritti prima**, approvati dall'autore il 23 settembre: guadagno ≥ 2 con due uscite collegate (C1); margini di rumore ≥ 20% dell'escursione (C2); 10 celle in cascata con qualità del segnale Q ≥ 7, livelli stabili e rigenerazione di un ingresso degradato (C3); tolleranza di ±1 K (C4); energia confrontata con il CMOS (C5, descrittivo); almeno 1 Gb/s (C6).
2. **Parametri con fonte.** Ogni numero da un articolo letto, con figura o tabella; nessun valore migliore del miglior dispositivo pubblicato. Disco, giunzione e perdite dal solo dispositivo del MIT, per non combinare dispositivi diversi; modello termico dal gruppo di Trento (Borghi, Pavesi e colleghi, 2021); riscaldatori e variabilità di fabbricazione da Parsons e colleghi (2025); riferimento CMOS dalla roadmap IRDS 2022 (0,65 fJ).
3. **Verifica dello strumento.** Il simulatore integra le equazioni nel tempo e deve riprodurre i dati del dispositivo, conservare l'energia e dare il rumore termico teorico: superata.
4. **Taratura** su una griglia dichiarata di 2520 combinazioni (polarità, tensioni, resistenza, distanza dal laser, potenza), con un vincolo di velocità scritto prima.
5. **Banco** su 12 seed, validazione 0–5 e conferma 6–11, 13.000 bit per catena.

4 Risultati

criterio	esito	valore
C1 guadagno	superato	2,13, al massimo due uscite
C2 margini	fallito	margine basso 0,003 contro 0,20
C3 cascata a 1 Gb/s	fallito	Q 14,7 alla cella 2, 7,5 alla 3, 0,01 alla 10
C4 temperatura	fallito	livelli stabili solo fra −0,4 e +0,1 K
C6 velocità	fallito	nessuna frequenza passa
C5 energia	livello B	10,6 pJ per operazione, circa 16.000 volte il CMOS

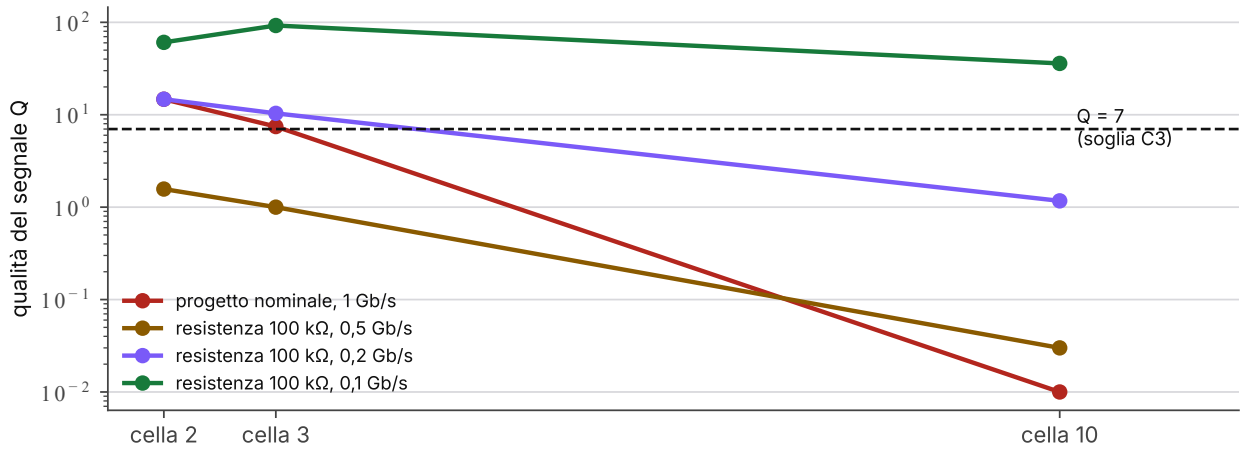

Figura 1. Qualità del segnale Q lungo una catena di 10 celle, per il progetto nominale a 1 Gb/s e per un progetto con resistenza di 100 kΩ a velocità minori (seed 0; gli altri 11 seed danno valori quasi identici). Il progetto nominale perde il segnale dopo la terza cella. Con 100 kΩ a 0,1 Gb/s il segnale arriva alla cella 10, ma i livelli non rigenerano un ingresso degradato. Dati dalla trascrizione del banco del 23 settembre 2026.

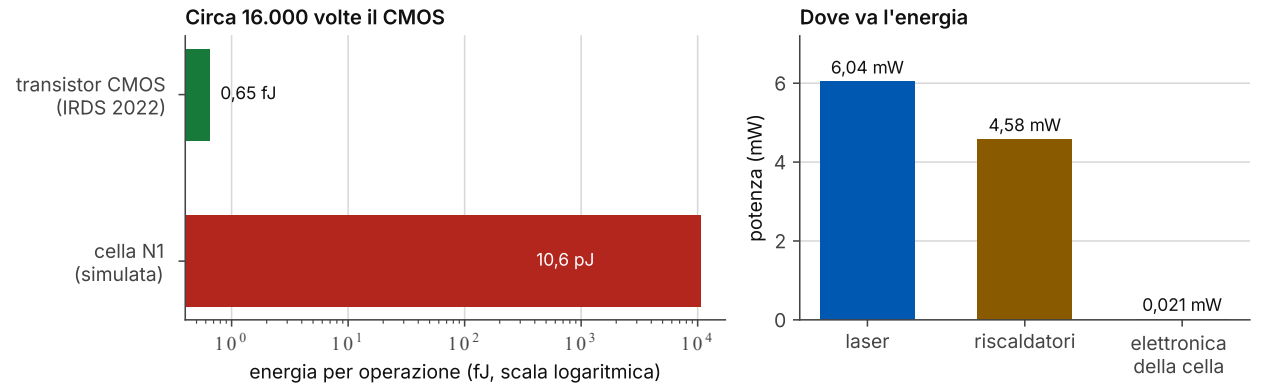

Figura 2. A sinistra, l'energia per operazione della cella N1 simulata contro un transistor CMOS (scala logaritmica). A destra, dove va la potenza: il laser, con un'efficienza di circa il 10% e le sue perdite, e i riscaldatori che compensano la variabilità di fabbricazione. Il dispositivo in sé consuma una parte trascurabile.

5 Perché non funziona

Tre vincoli si contraddicono. Il **guadagno** chiede resistenze grandi, la **velocità** resistenze piccole, e alzare la potenza del laser **scalda** il disco: 8,4 K per milliwatt, contro circa 3 K per spostare la risonanza di una larghezza di riga. Il calore crea isteresi o si oppone al segnale. L'energia è dominata dal laser e dai riscaldatori, non dal dispositivo. Con i parametri pessimistici la porta non ha nemmeno due livelli stabili.

6 Correzioni lungo la strada

Tutte registrate nella scheda, prima di usare i seed del banco:

- larghezza di riga da 0,17 nm (letta a occhio) a 0,31 nm (grafico) a **0,25 nm** (testo dell'articolo, 30 GHz);
- responsività del fotodiodo da 0,8 A/W (riassunto) a **0,26 A/W** alla lunghezza d'onda del dispositivo;
- due incoerenze nella fonte stessa documentate e non risolte;
- una variante veloce della simulazione scartata perché non superava la verifica registrata (1,09% contro 1%);
- un errore del banco trovato dalla prova di fumo, corretto prima del run.

7 Cosa dimostra e cosa no

Dimostra che con questo dispositivo e questi componenti una porta ottico-elettrica in cascata non soddisfa i requisiti di una logica utile, e che il costo energetico è dominato da laser e riscaldatori.

Non dimostra che nessuna porta ottico-elettrica possa funzionare: la smentita vale per la cella N1 con questo dispositivo, senza ottimizzazione del dispositivo. Riscaldatore, termica e portatori vengono da

dispositivi diversi, e la loro combinazione non è dimostrata.

Secondo la regola scritta prima, la linea «logica fotonica» si è fermata qui, e si è passati alla domanda successiva: un circuito cerebrale su neuroni laser (NR-08).

> **Limiti.** Simulazione, non misura. Il nodo non può uscire dall'intervallo di tensioni misurato nell'articolo. I valori letti dai grafici hanno un'incertezza dichiarata. Nessun chip è stato fabbricato.

Riferimenti

- Miller, D. A. B. (2010). Are optical transistors the logical next step? *Nat. Photon.* 4, 3.
- Timurdogan, E. e colleghi (2014). An ultralow power athermal silicon modulator. *Nat. Commun.* 5, 4008.
- DeRose, C. T. e colleghi (2011). Ultra compact 45 GHz CMOS compatible germanium waveguide photodiode with low dark current. *Opt. Express* 19, 24897.
- Borghi, M., Bazzanella, D., Mancinelli, M. e Pavesi, L. (2021). *Opt. Express* 29, 4363.
- Parsons, K. e colleghi (2025). arXiv 2503.09009; *Nanophotonics*.
- Miller, D. A. B. (2017). Attojoule optoelectronics for low-energy information processing and communications. *J. Lightwave Technol.* 35, 346 (arXiv 1609.05510).
- IRDS 2022, More Moore.
- Documenti interni: whitepaper WP-P1; scheda `photonics/registry/p1_cella_n1.yaml`; registri `p1_c0_20260923_1739`, `p1_taratura_20260923_1959`, `p1_banco_20260923_2118`.

Come citare

Chiarolanza, G. (2026). Una porta logica fatta di luce: la cella N1 in cascata. Nadirion, rapporto di ricerca NR-07, 23 settembre 2026. https://nadirion.eu/ricerche/porta-logica-fotonica/

Rapporto tecnico di Nadirion, non sottoposto a revisione paritaria. I criteri di ogni test sono stati scritti prima di eseguirlo; i risultati negativi sono riportati come quelli positivi. I test misurano ruoli funzionali.