



بسم الله الرحمن الرحيم



موضوع سمینار :

ادوات نانو الکترونیک مبتنی بر فسفر سیاه

خرداد ۱۳۹۶



فهرست مطالب

❖ مقدمه در مورد فسفر سیاه

❖ ساختار کاربردی فسفر سیاه در نانوالکترونیک

❖ کاربردهای فسفر سیاه در نانوالکترونیک

❖ نتیجه گیری و جمع بندی

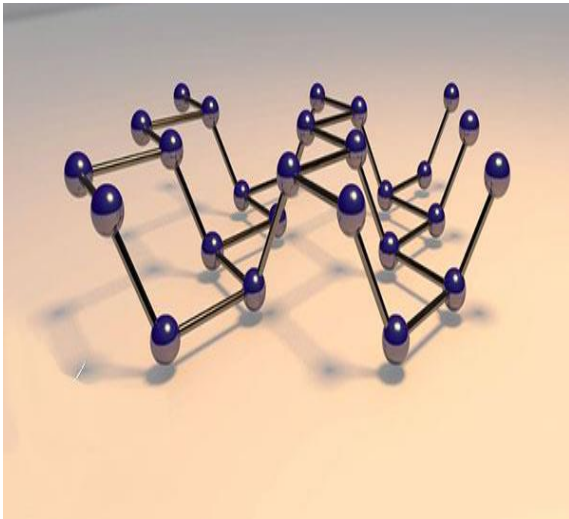
❖ مراجع

- فسفر سیاه یک ماده لایه ای است که در آن لایه های مجزای اتمی با نیروی واندروالسی کنار هم قرار گرفته اند. شباهت زیادی به گرافن و سیلیسن دارد.

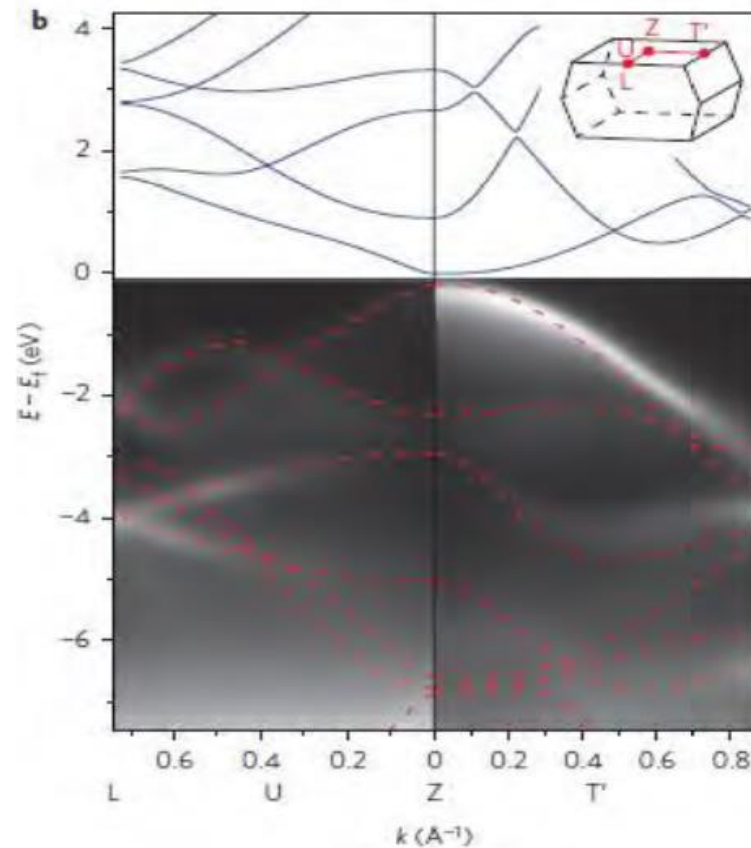
- داخل یک تک لایه هر اتم فسفر با سه اتم مجاور خود پیوند کوالانسی تشکیل می دهد تا ساختار لانه زنبوری تشکیل دهند. این سه پیوند تمام سه الکترون والانس فسفر را می گیرند، بنابراین برخلاف گرافن فسفر سیاه تک لایه ای یک نیمه رسانا با شکاف باند مستقیمی معادل 2 eV است.

- برای فسفرین چند لایه ای بر هم کنش های میان لایه ای شکاف باند را برای هر لایه ای که اضافه شود کاهش می دهند و در نهایت برای فسفر سیاه بدنه به 0.3 eV می رسد.

ساختار اتمی فسفر سیاه



ساختار باند فسفرین سیاه





دلایل توجه روز افزون به فسفر سیاه

ماده نیمه هادی با شکاف باند مستقیم

امکان استفاده به جای گرافن

شکاف باند وابسته به ضخامت

استفاده در الکترونیک نوری بویژه در محدوده مادون قرمز

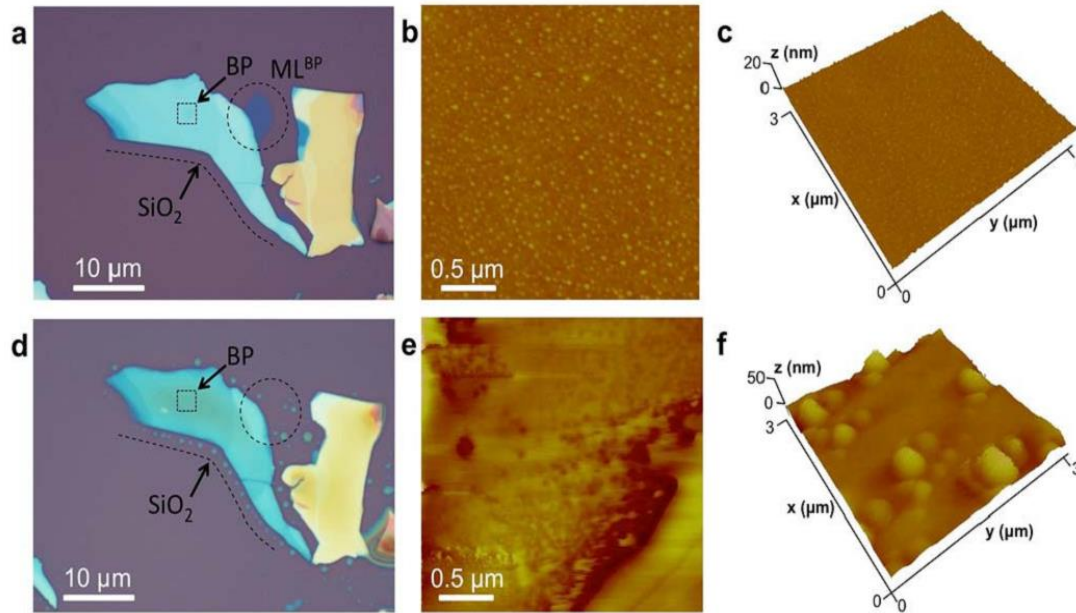
انتقال فازی از نیمه هادی به فلز و ابر رسانا



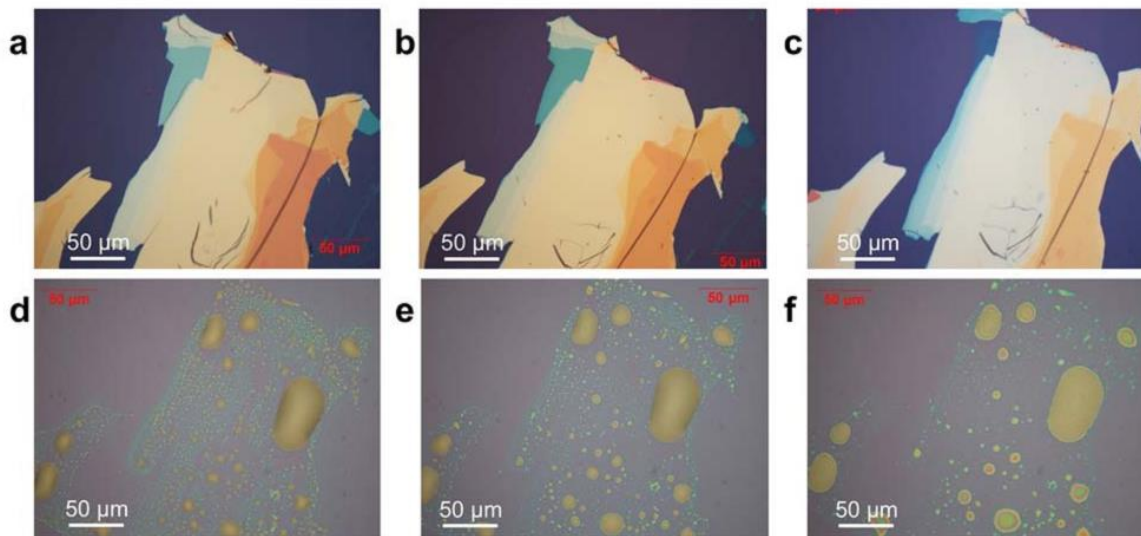
ساختار کاربردی فسفر سیاه در نانو الکترونیک

- در این گزارش ساخت ابزار هایی با استفاده از فسفرن چندلایه ای را بررسی کرده ایم.
- مشخصات الکترونیکی این نوع ادوات را با مدل سازی اثر میدان الکتریکی مورد بررسی قرار داده ایم. عملکرد ترانزیستور در دمای اتاق را بررسی می کنیم.
- ویژگی های مهم نظیر مدولاسیون جریان درین و قابلیت تحرک در این ادوات، بهتر و یا قابل مقایسه با آن دسته از ترانزیستور های اثر میدانی می باشد که با سایر مواد لایه ای از جمله گرافن ساخته شده اند.

ساختار کاربردی فسفر سیاه در نانو الکترونیک



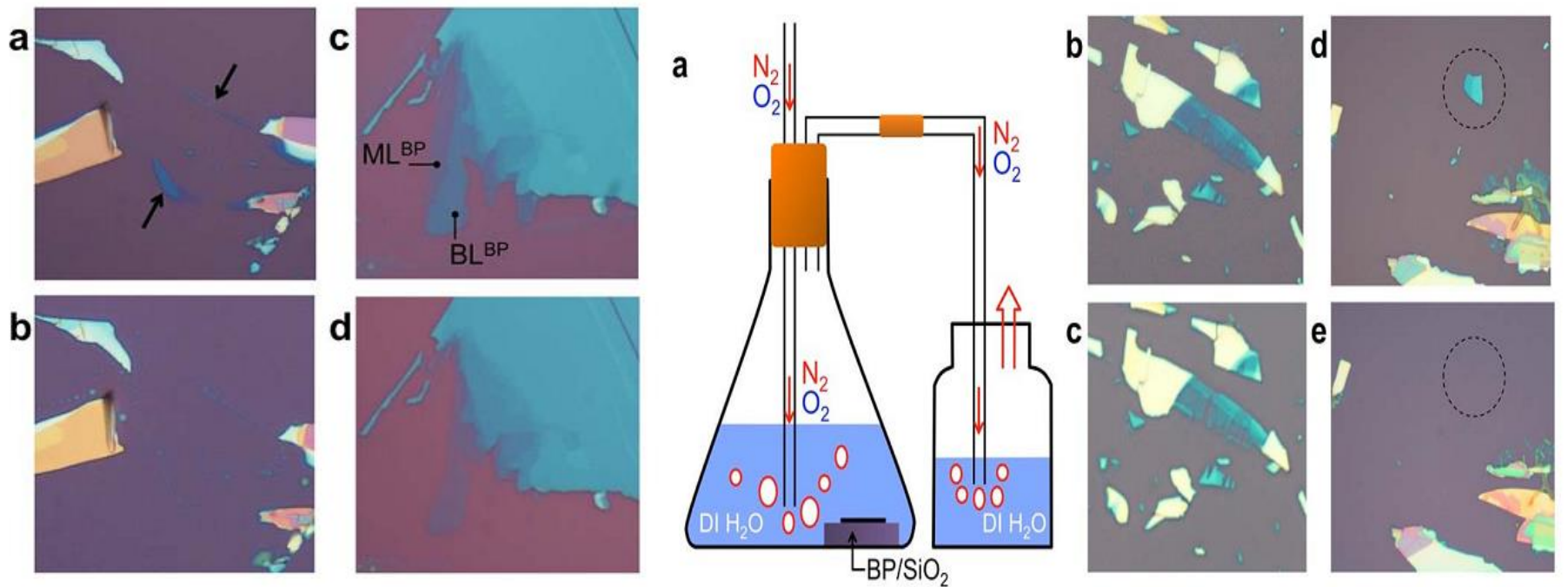
تصاویر اپتیکی و AFM یک فلز فسفر سیاه پشته‌بانی شده با SiO_2/Si



تغییر ریخت‌شناسی فسفر سیاه تراش خورده روی SiO_2/Si بعد از قرار دادن آن در آب :

- (a) تصاویر اپتیکی یک فلس تراش خورده تازه
- (b) همان فلس بعد از قرار دادن در آب دی‌یونیزه به مدت یک هفته
- (c) همان فلس پس از قرار دادن آن در آب به مدت دو هفته
- (d) تصویر بعد از برداشتن فلس از آب دی‌یونیزه و هوادهی آن به مدت یک هفته
- (e) همان نمونه بعد از حل کردن فلس
- (f) بعد از بازپخت 250°C درجه برای ۲ ساعت در خلأ خیلی زیاد.

ساختار کاربردی فسفر سیاه در نانو الکترونیک

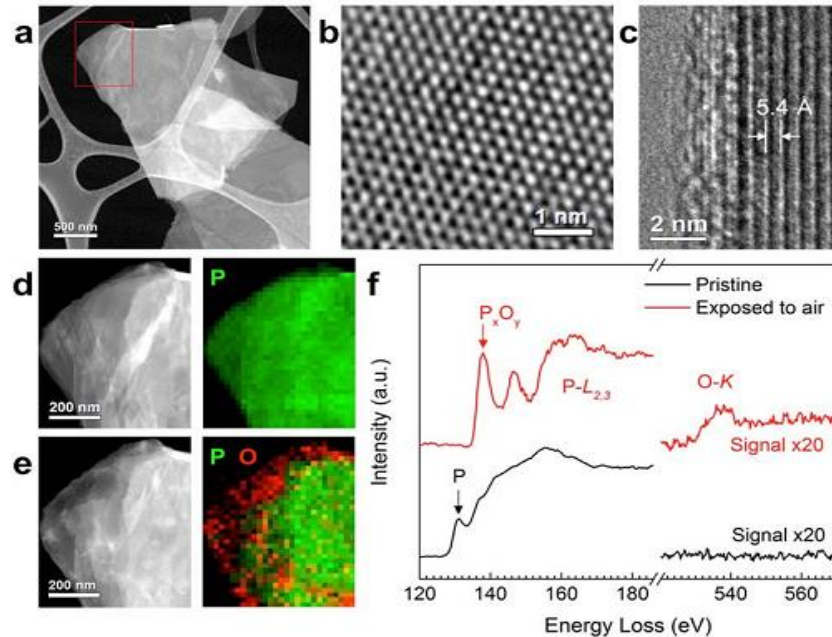


▶ اثرات هوادهی و غوطه وری در آب برای فلز های فسفر سیاه تراش خورده

▶ اثرات غوطه ور کردن در آب دی یونیزه بدون اکسیژن و غنی از اکسیژن روی فلز های فسفر سیاه

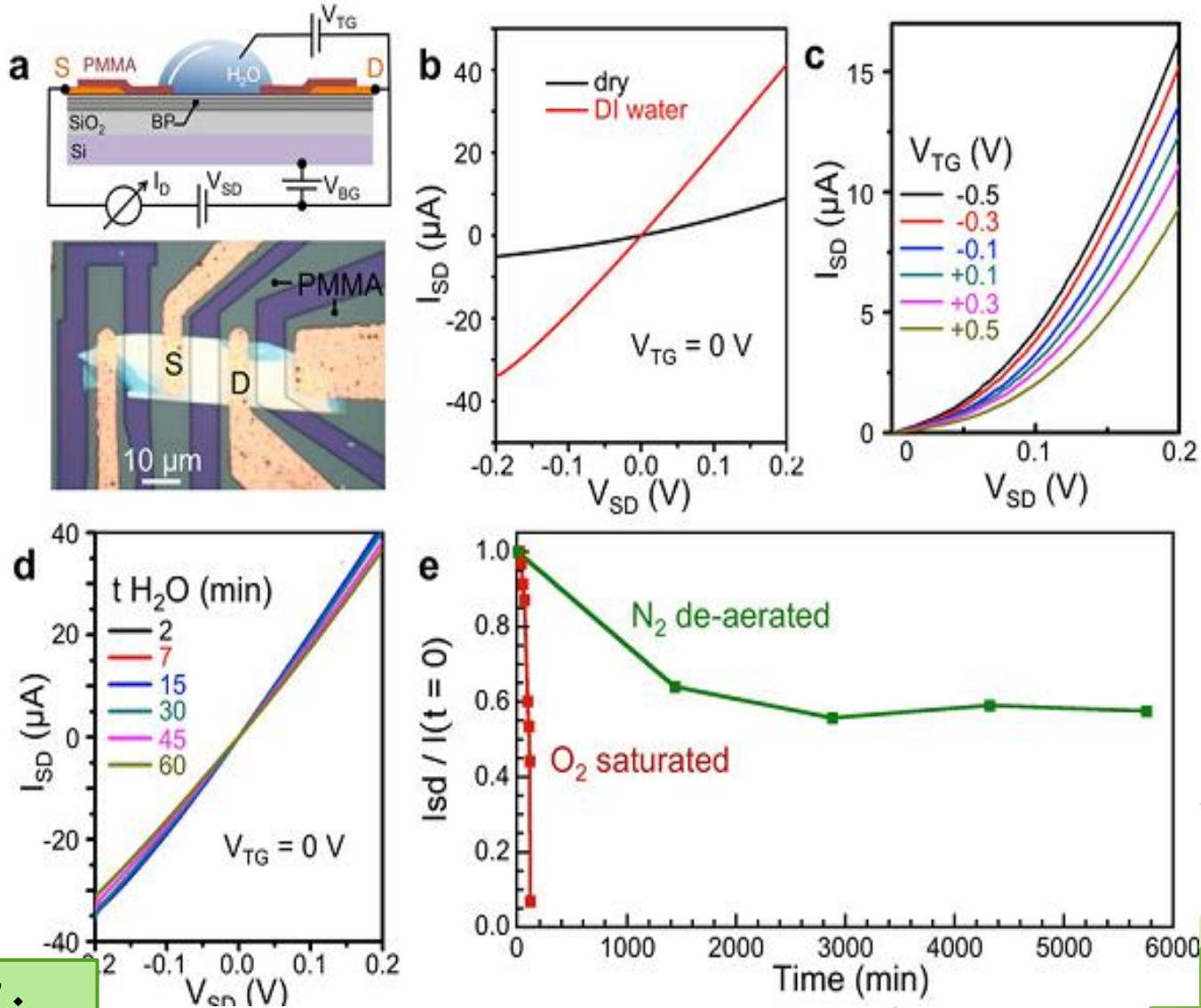
▶ میکروگراف اپتیکی از فلز های فسفر سیاه تازه تراش خورده روی پایه SiO_2/Si . براساس کنتراست اپتیکی بین آنها، قطعات آبی عمیق به عنوان فسفر سیاه تک لایه و دولایه شناسایی می شوند

مشخصه‌های (S)TEM و EELS یک فلس فسفر سیاه چندلایه قبل و بعد از هوادهی

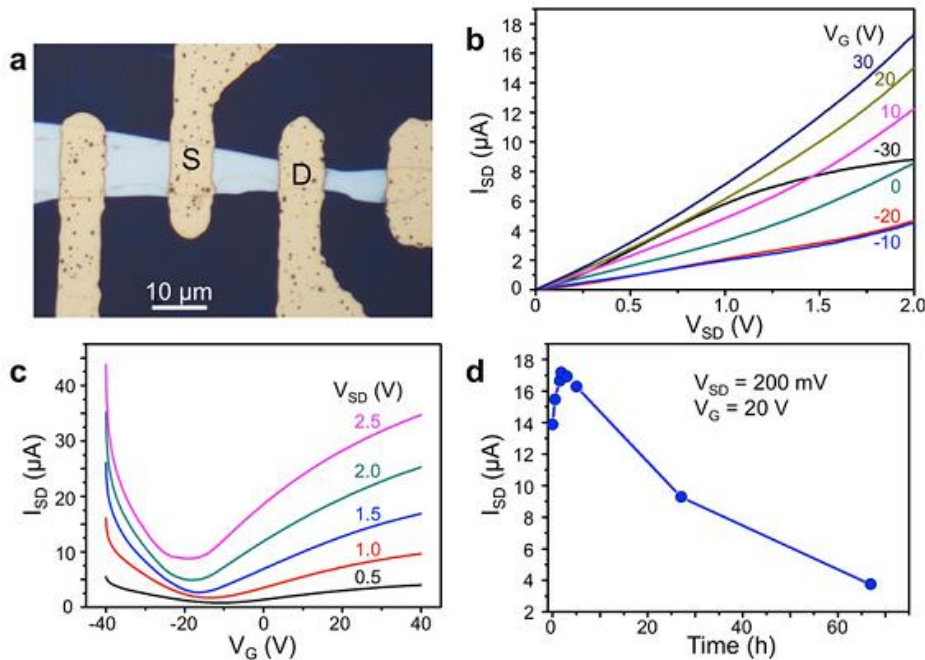


- طیف EELS نمونه‌های فسفر سیاه تازه و اکسیدشده (هوادهی یک‌روزه)
- نمایش صفحه‌ای با کیفیت بالا از تصویر TEM برای یک فلس فسفر سیاه
- تصویر بزرگ شده STEM درون سطح مربعی در A نشان داده شده است و نقشه 2D STEM-EELS متناظر با فلس فسفر سیاه فوراً بعد از تراش

انتقال الکتریکی در یک دستگاه FET فسفر سیاه با آب دی یونیزه درگاه بالا



انتقال الکتریکی در دستگاه FET فسفر سیاه پشت-درگاهی (روی SiO_2/Si) در معرض هوا



تصویر اپتیکی دستگاه FET فسفر سیاه. S منبع، D الکترود تخلیه.

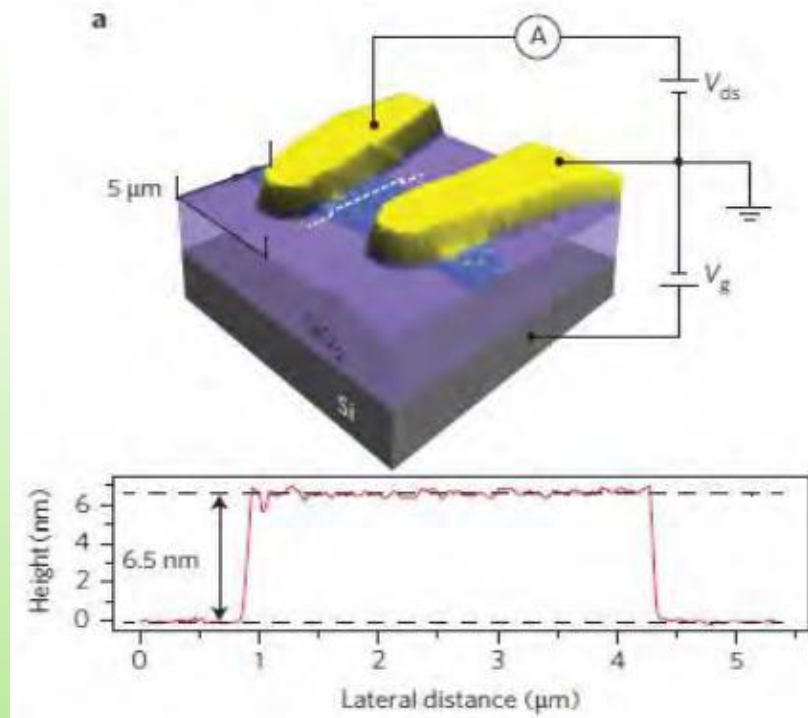
منحنی های جریان درین سورس بر حسب ولتاژ درین سورس هنگامی که ولتاژ پشت گاهی (ولتاژ گیت) از -30 V تا $+30 \text{ V}$ تغییر می کند.

ارتباط دوقطبی بین جریان درین سورس و ولتاژ گیت برای تغییر ولتاژ درین سورس از 0.5 تا 2.5 ولت

جریان درین به عنوان یک تابع از زمان هوادهی

ساخت ترانزیستور اثر میدانی با فسفرین چند لایه ای

- کریستال های فسفر سیاه تحت فشار و دمای بالا رشد داده می شوند
- ترانزیستور های اثر میدانی فسفرین چند لایه ای را با یک الکتروود گیت پشتی ساخته می شود.





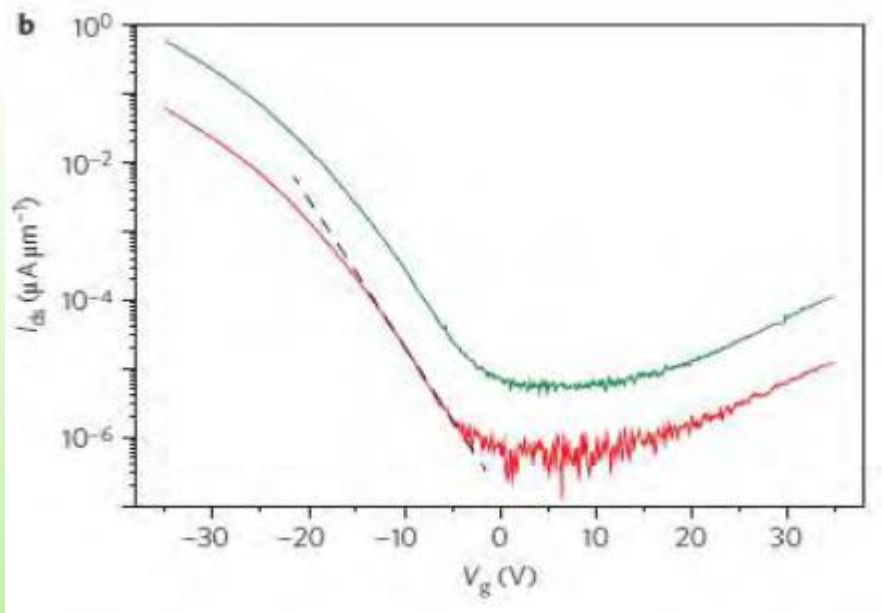
ساخت ترانزیستور اثر میدانی با فسفرین چند لایه ای

کنتاکت های فلزی روی پولک های نازک فسفرین با پرتاب الکترونی بخار کروم و طلا و از طریق ماسک استنسیل که با نمونه هم تراز بود، رسوب گذاری می کنند

به ترتیب دارای ۵ نانو متر و ۶۰ نانو متر می باشند.

یک فرآیند لیتوگرافی با پرتو الکترونی استاندارد، کنتاکت های فلزی دیگری نظیر تیتانیوم/طلا نیز بکار میروند.

وقتی که ولتاژ گیت از -30 ولت تغییر می کند، کانال از **on** به **off** سوئیچ شده و جریان درین با ضریب 10^5 افت می کند. مدولاسیون جریان درین اندازه گیری شده، چهار برابر بزرگتر از همتای گرافینی خود می باشد. این امر به دلیل فقدان شکاف باند گرافین است.

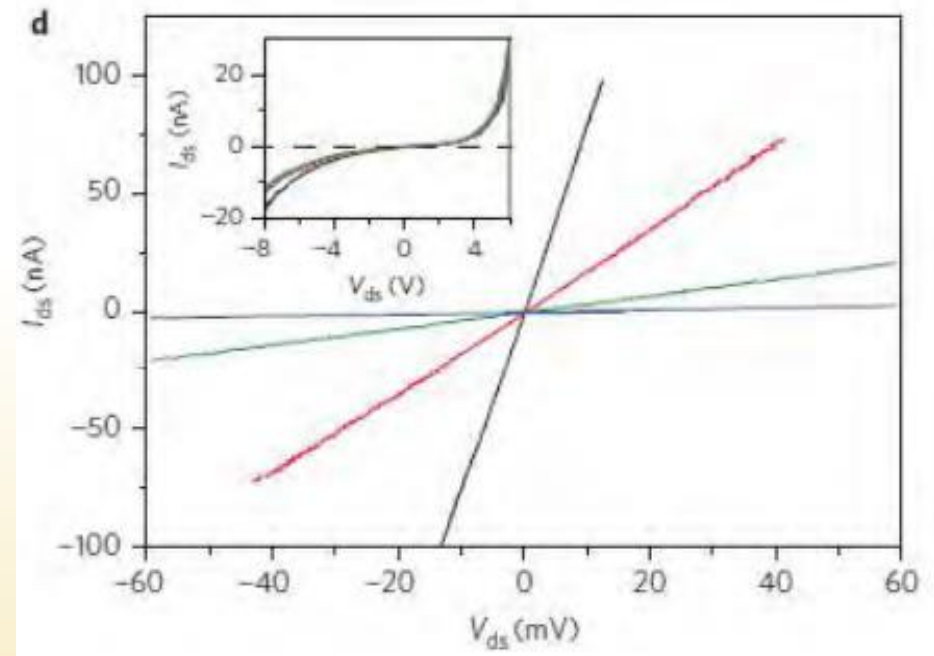
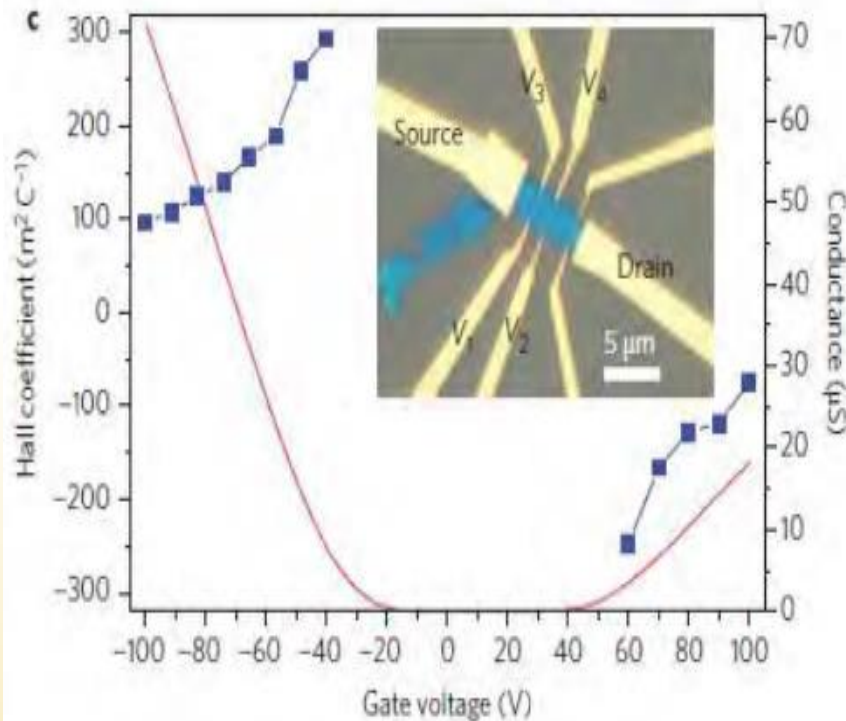


با استفاده از مواد با ضریب دی الکتریک بالا به عنوان دی الکتریک گیت برای آلایش بالاتر می توان به مدولاسیون جریان درین بالا تر دست یافت.

یک نوسان زیر آستانه ای ۵ ولتی در هر دهه مشاهده می شود که بسیار بزرگتر از نوسان زیر آستانه ای در ابزار های مبتنی بر سیلیکون (70 mV در هر دهه) است..

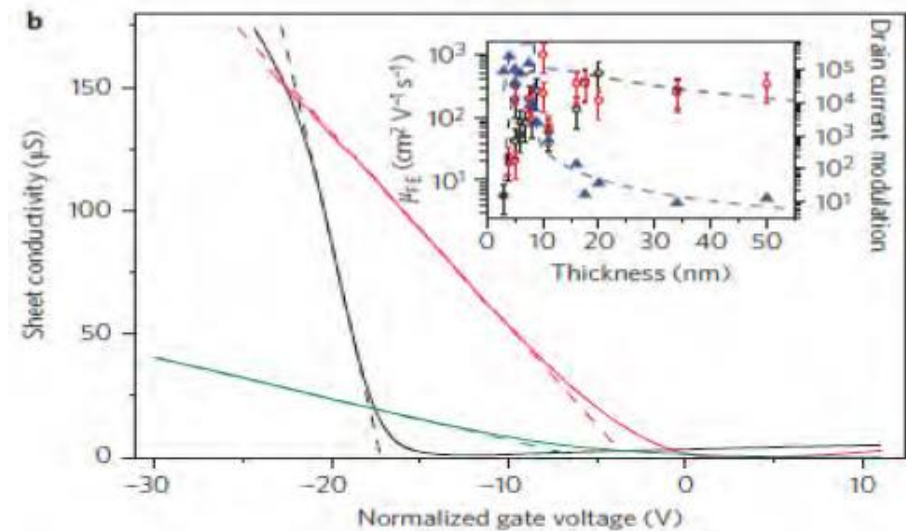
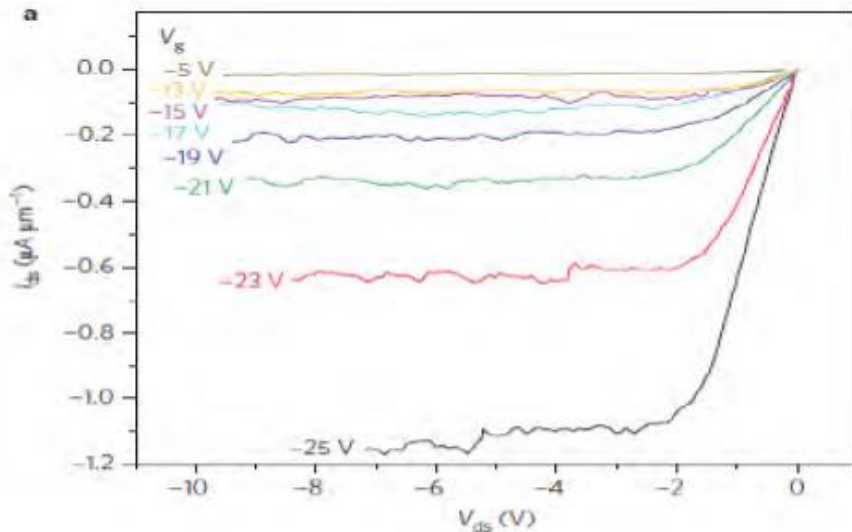
نوسان زیر آستانه ای در ترانزیستور از یک نمونه به نمونه ای دیگر متغیر است. (از $3,7$ ولت در هر دهه تا $13,3$ ولت در هر دهه)

تغییر علامت حامل، کاملاً در حالت های روشن نمایان است و ولتاژ های گیت مثبت متناظر هدایت حفره و منفی متناظر با هدایت الکترون است.

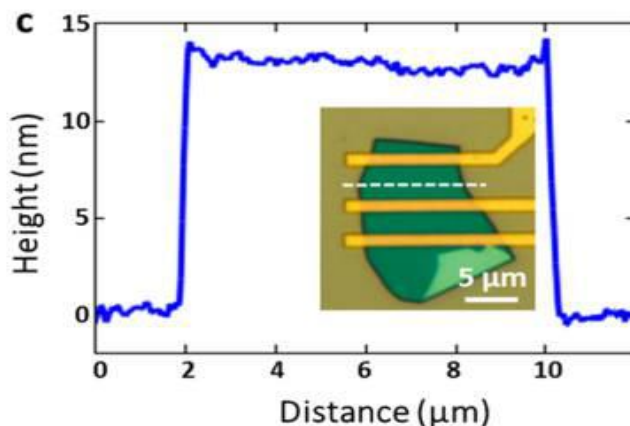
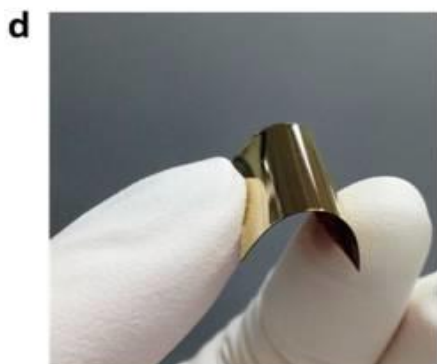
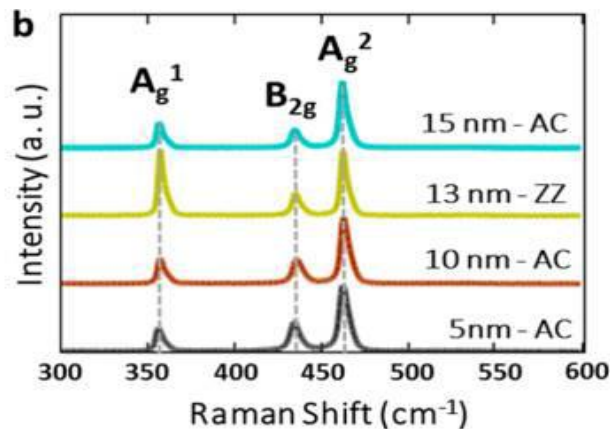
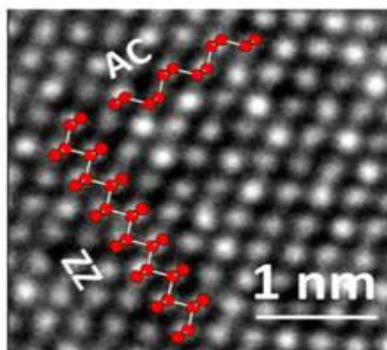


خصوصیات I/V ترانزیستور مورد نظر را نشان میدهد. در ولتاژ های گیت مشخص شده رفتاری خطی دارد که نشان دهنده تماس اهمی در سمت حفره گیت تزریق شده است.

طول و عرض کانال به ترتیب ۴,۵ میکرومتر و ۲,۳ میکرومتر می باشد. ناحیه اشباع برای همه ولتاژهای اعمال شده گیت مشاهده شده است.

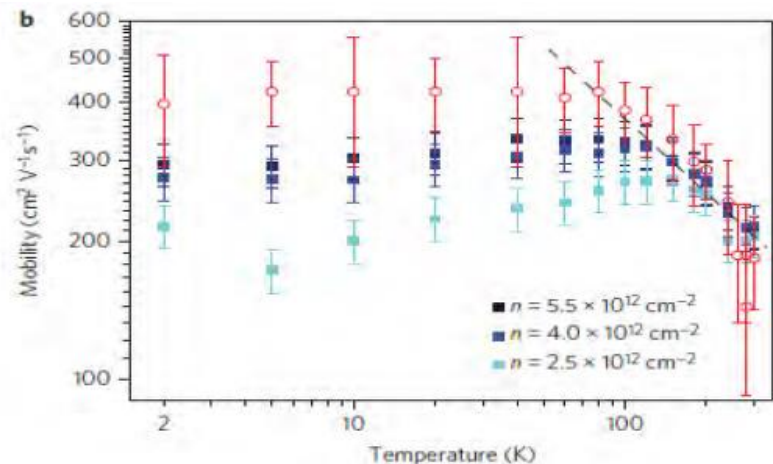
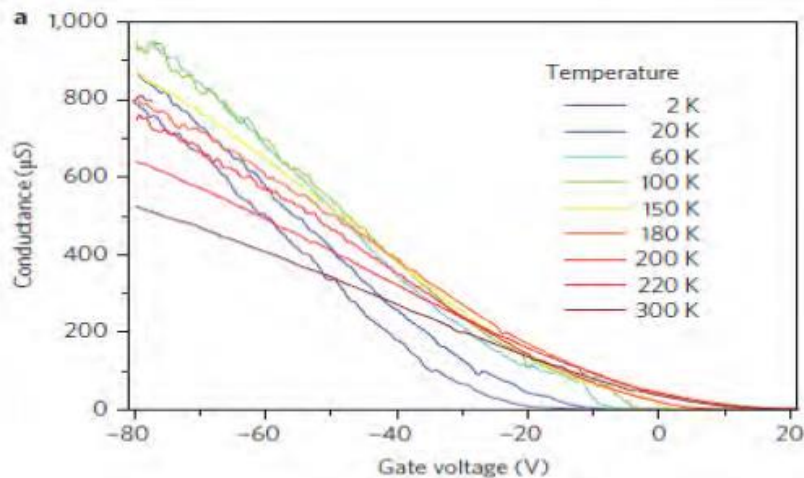


هدایت صفحه ای به عنوان تابعی از ولتاژ گیت برای ترانزیستور با ضخامت گوناگون اندازه گیری شده: ۱۰ نانومتر (خط ممتد سیاه) و ۵ نانومتر (خط سبز ممتد)



- (۱) لایه های نازک فسفر سیاه
- (۲) طیف رامان
- (۳) مودار AFM بلندی لایه های فسفر نسبت به فاصله
- (۴) انعطاف پذیری فسفر سیاه

هدایت به عنوان تابعی از ولتاژ گیت در ضخامت نمونه ۸ نانومتر در دماهای مختلف اندازه گیری می شود. طول و عرض کانال ۲,۶ میکرومتر و ۸,۶ میکرومتر می باشد.



قابلیت حرکت اثر میدان (دایره های قرمز باز) و قابلیت حرکت هال (مربع پر شده در سه مقدار مختلف n) به عنوان یک تابعی از دما در مقیاس لگاریتمی

- ❖ بررسی ترانزیستور های اثر میدانی نوع p که روی فسفرین چندلایه ساخته شده پرداخته شد.
- ❖ نمونه ها رفتار دو قطبی از خود نشان دادند که با مدولاسیون جریان درین که به بالای 10^5 می رسد و مقدار قابلیت حرکتی که به $1000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1}$ در دمای اتاق می رسد
- ❖ قابلیت حرکت حامل توسط پراکندگی ناخالصی بار در دمای پایین و پراکندگی الکترون - فونون در دما های بالا محدود می گردد.
- ❖ جریان روشن کم است و نوسان زیر آستانه ای بالاست اما بهینه سازی دی الکتریک گیت باید به بهبود این مشخصات بیانجامد.
- ❖ با این ویژگی ها در زمینه نانو الکترونیک و اپتو الکترونیک سفر سیاه آینده بسیار خوبی دارد.

- در انتها مشخصات ترانزیستور ها را که از جنس های مختلف مواد لایه ای ساخته شده اند با هم مقایسه می کنیم :

material	FET mobility (cm ² /V.s)		ON/ OFF ratio	film thickness (nm)	transport type
	μ_e	μ_h			
black phosphorus (this work)	89	310	10^3-10^4	15	ambipolar
	3	180	10^4-10^5	5	ambipolar
MoS ₂ ref 7	30		10^7-10^8	10	n-type
WSe ₂ ref 18	24	45	10^7	1.5	ambipolar
SnS _x Se _{2-x} ref 19	12		10^6	5	n-type
pentacene ref 20		8.85	10^3-10^4	65	p-type
InGaZnO ref 21	76		10^5	23	n-type

- [1] Self-Assembled Layer (SAL)-Based Doping on Black Phosphorus (BP) Transistor and Photodetector Dong-Ho Kang, Min Hwan Jeon, Sung Kyu Jang, Woo-Young Choi, Kyong Nam Kim, Jinok Kim, Sungjoo Lee, Geun Young Yeom, and Jin-Hong Park (2014)
- [2] Degradation of Black Phosphorus (BP): The Role of Oxygen and Water Yuan Huang, Kai He, Stoyan Bliznakov, Eli Sutter, Fanke Meng, Dong Su and Peter Sutter (2015)
- [3] Black phosphorus field-effect transistors Likai Li, Yijun Yu, Guo Jun Ye, Qingqin Ge, Xuedong Ou, HuaWu, Donglai Feng, Xian Hui Chen and Yuanbo Zhang (2014)
- [4] Flexible Black Phosphorus Ambipolar Transistors, Circuits and AM Demodulator Weinan Zhu, Maruthi N. Yogeesh, Shixuan Yang, Sandra H. Aldave, Joon-Seok Kim, Sushant Sonde, Li Tao, Nanshu Lu and Deji Akinwande (2015)
- [5] Black Phosphorus Photodetector for Multispectral, High-Resolution Imaging Michael Engel, Mathias Steiner, and Phaedon Avouris (2014)
- [6] Symmetric Complementary Logic Inverter Using Integrated Black Phosphorus and MoS₂ Transistors Yang Su, Chaitanya U Kshirsagar, Matthew C Robbins, Nazila Haratipour, and Steven J Koester (2016)
- [7] High-mobility transport anisotropy and linear dichroism in few-layer black phosphorus Jingsi Qiao, Xianghua Kong, Zhi-Xin Hu, Feng Yang & Wei Ji (2014)
- [8] Strain-Induced Gap Modification in Black Phosphorus A. S. Rodin, A. Carvalho, and A. H. Castro Neto (2014)
- [9] Black Phosphorus Monolayer MoS₂ van der Waals Heterojunction pn Diode Yexin Deng, Zhe Luo, Nathan J. Conrad, Han Liu, Yongji Gong, Sina Najmaei, Pulickel M. Ajayan, Jun Lou, Xianfan Xu, and Peide D. Ye (2014)
- [10] Phosphorene: An Unexplored 2D Semiconductor with a High Hole Mobility Han Liu, Adam T. Neal, Zhen Zhu, Zhe Luo, Xianfan Xu, David Toma nek, and Peide D. Ye (2014)

با سپاس
فراوان

