

Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1

Электронный лекционный курс*

Судников А. В.

Лекция 10

Анализ продуктов термоядерных реакций

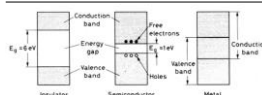
© Новосибирский государственный университет 2013 г. Редакция 2017 г.

* Курс подготовлен в рамках реализации Программы развития НГУ на 2009–2018 годы

Анализ продуктов термоядерных реакций

- Основные реакции синтеза. Сечения и скорости реакций
- Полный нейтронный выход. Мгновенная интенсивность
 - Пузырьковые камеры
 - Использование ядерных реакций
- Энергетический спектр нейтронов и гамма-излучения
 - Сцинтиляционные детекторы
 - Нейтрон/гамма разделение
 - Полупроводниковые и алмазные детекторы (нейтроны и гамма-кванты)
 - Времяпролётные спектрометры
- Регистрация заряженных продуктов реакции

Полупроводниковые детекторы (Semiconductor detectors)



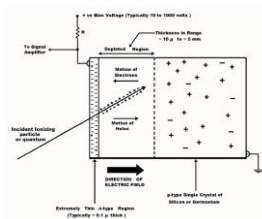
Область p - n -перехода при запирающем напряжении обеднена носителями заряда.

Нейтрон в полупроводнике образует электрон-дырочные пары.

Возникает импульс тока.

Длительность определяется временем дрейфа зарядов через обеднённую область.

Энергия, затраченная на пару, сравнима с шириной запрещённой зоны (несколько больше: $\sim 3,8$ эВ для Si, $\sim 2,9$ эВ для Ge, ~ 13 эВ для C).



Полупроводниковые детекторы

Table 1
Room temperature sensor materials for fission neutron detection

Material	n (atoms/cm ³)	$\langle\sigma_n\rangle$ (bF)	$(\mu_n)^2$ (%/mm ²)
Diamond	17.6×10^{22}	2.31	4.1
o-BN	17.3×10^{22}	2.16	3.7
BC317P ⁶	11.1×10^{22}	3.19	3.5
BC400 ⁶	10.0×10^{22}	3.06	3.0
SiC ⁷	9.6×10^{22}	2.65	2.5
GaN	8.8×10^{22}	2.85	2.5
Si	5.2×10^{22}	2.84	1.5
GaAs	4.4×10^{22}	4.17	1.8
CdTe	3.0×10^{22}	5.49	1.7

⁶ Liquid scintillator [15].
⁷ Plastic scintillator [15].
⁸ Neutron cross sections (from the ENDF database, <http://www.ndg.llnl.gov/>) averaged over an unmoderated spontaneous fission neutron spectrum [15] with a T parameter of 1.0 MeV (P12259). Natural abundances are assumed.
⁹ Linear attenuation coefficient as calculated from the product of n and $\langle\sigma_n\rangle$.

Полный протекший заряд пропорционален потерянной в обеднённой области энергии. Интенсивность потери энергии приблизительно одинакова для всех быстрых нейтронов → Амплитуда импульса пропорциональна энергии частицы. В слое $d \sim 100$ мкм нейтрон теряет $\sim 0.1\% E$ (~ 10 кэВ). «Мёртвый слой» на поверхности должен быть тонким Темновой ток вызван основными носителями в зоне проводимости → в общем случае требуется охлаждение.

© Institute of Physics Publishing and the American Physical Society, 2007. DOI: 10.1088/0031-9007/41/10/010

Полупроводниковые детекторы: некоторые свойства

Intrinsic Material Properties

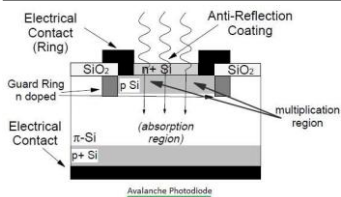
	Si	4H-SiC	6H-SiC	Natural Diamond	OD Diamond	Potential device application benefit
Bandgap (eV)	1.1	3.2	3.44	5.47	5.47	High temperature
Breakdown field (MV/cm ²)	0.3	3	5	10	10	High voltage
Electron saturation velocity ($\times 10^7$ cm/s ¹⁰)	0.86	3	2.5	2	2	High frequency
Hole saturation velocity ($\times 10^7$ cm/s ¹⁰)	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	
Electron mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	1400	900	440	200-2800	4000	
Hole mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	480	120	200	1800-2100	3800	
Thermal conductivity (W/cm ² K ⁻¹)	1.5	5	1.3	22	24	High power
Johnson's figure of merit	1	410	280	8200	8200	Power-frequency product
Krytox' figure of merit	1	5.1	1.8	32	32	Transient behavior thermal limit
Baliga's figure of merit	1	290	910	882	17300	Unipolar HF device performance

ibweg, J., et al., Science (2002) 297, 1670

Длительность импульса

$$\tau \sim \frac{d}{v_{\pm}} \sim \frac{d}{bE} \sim \frac{d^2}{bU} \sim 10^{-7} - 10^{-9} \text{ s}$$

Лавинные диоды



Чувствительность может быть повышена (в обмен на энергетическое разрешение) за счёт использования лавинного усиления в диоде.

Частицы поглощаются в широкой поглощающей области. В области усиления электрическое поле достаточно для образования вторичных пар (почти пробой).

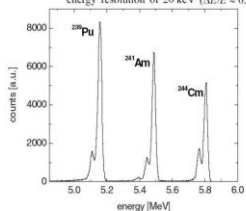
Алмазные детекторы (Diamond detectors/CVD detectors)



- Алмаз имеет ширину запрещённой зоны 5.47 эВ
- При высокой температуре алмаз является полупроводником
- Алмаз при комнатной температуре эквивалентен криогенно охлаждённому полупроводнику
- Может быть использован природный алмаз (группа IIa — бесцветный, без примесей) либо химически осаждённый из газовой фазы (chemical vapor deposition, CVD)

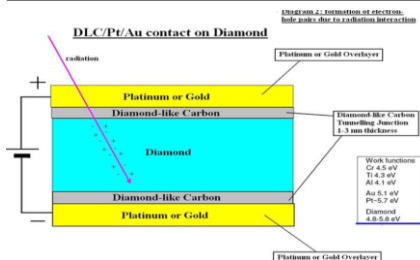
Алмазные детекторы

M. Pomorski et al. phys. stat. sol. (a) 202, No. 11 (2005)
energy resolution of 20 keV ($\Delta E/E = 0.004$)



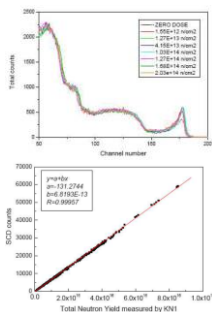
Высокая подвижность и низкая концентрация носителей позволяет обойтись собственной проводимостью. Может использоваться предельно чистый алмаз. Достижимо энергетическое разрешение ~0.4%. Детектор чувствителен к любому ионизирующему излучению и УФ с энергией больше ширины запрещённой зоны.

Алмазные детекторы



Galbati et al. IEEE TNS VOL 56 N 4 AUGUST 2009 p1863

Радиационная стойкость



Максимально плотная упаковка атомов в кристаллической решётке усложняет выбивание атомов из её узлов → высокая радиационная стойкость.

В условиях ИТЭР требуется стойкость к флюенсам $\sim 10^{14}$ см⁻².

Вверху: измерение нейтронного спектра на токамаке JET после облучения детектора различными флюенсами.

Внизу: сравнение данных алмазного детектора и нейтронного монитора в токамаке JET в течение двухлетней кампании

http://www-norhida.gsi.de/talks/4thV_Verona-Rinati.pdf

Алмазные детекторы

JET

Discharge 42976

Алмазные детекторы

$^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$, 6.2 MeV

Сечение 0.08 барн при 14 МэВ

$^{12}\text{C}(n, n0, \alpha)^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$

Сечение упругого и неупр. расс. ~ 1 барн

$^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}^*$

Сечение 0.2 барн при 14 МэВ

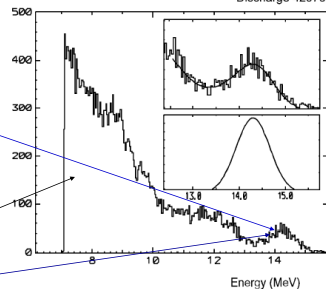
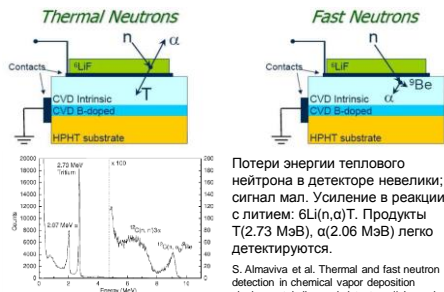


Fig. 2. NDD4 (tangential) pulse height spectrum (counts per channel) accumulated during 1 s of the JET record fusion power plasma shot 42976. The inset shows a Gaussian fit (upper plot) to the full energy line, and (lower plot) the assumed Gaussian spectrum superimposed on a weak background.

Characterisation of CVD diamond detectors used for fast neutron flux monitoring
F. Franks*, P. Roguski*, V.N. Antonov**, Yu. Kaidanov*, V. Frazee*, G. Tommasi*, A. Wozniak*

Регистрация тепловых нейтронов алмазными детекторами



Потери энергии теплового нейтрона в детекторе невелики, сигнал мал. Усиление в реакции с литием: $6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$. Продукты T(2.73 МэВ), α (2.06 МэВ) легко детектируются.

S. Almaviva et al. Thermal and fast neutron detection in chemical vapor deposition single-crystal diamond detectors // Journal of Applied Physics 103, 054501 (2008)

FIG. 3. PNA spectrum under neutron irradiation. To the right side of the figure, the vertical scale is magnified by a factor 100.

Времяпролётный анализатор

Начальная энергия нейтронов E_n . Энергия рассеянного нейтрона

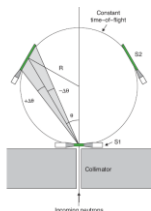
$$E_n' = E_n \cdot \cos^2\theta$$

Расстояние пролёта в любую точку на сфере:

$$L(\theta) = 2 \cdot R \cdot \cos \theta$$

Начальная энергия E_n однозначно определяется временем полета t_{TOF} между двумя детекторами:

$$E_n = \frac{2m_n R^2}{t_{TOF}^2}$$

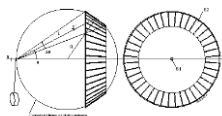
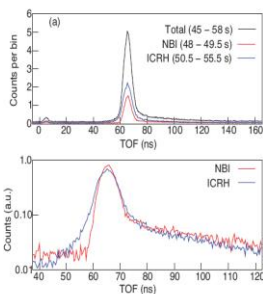


The radius of the sphere is $R = 705$ mm, resulting in a flight time of 64 ns for 2.5MeV neutron

T. Elevant et al. The new JET 2.5-MeV neutron time-of-flight spectrometer // Rev. Sci. Instrum., V. 63, Issue 10, October 1992, pp.4586-4588

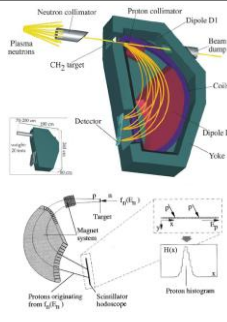
Времяпролётный анализатор

«Сырые» спектры нейтронов в различных экспериментах на токамаке JET.



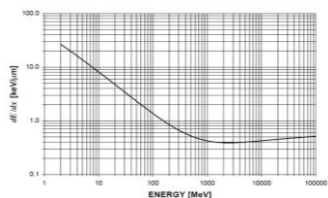
Магнитный анализатор протонов отдачи

При рассеянии нейтронов на (полиэтиленовой) мишени образуются протоны отдачи. Протоны, рассеянные вперёд, получают всю энергию. Протоны могут быть разделены магнитным анализатором.



Goran Ericsson et al. Neutron emission spectroscopy at JET—results from the magnetic proton recoil spectrometer // Review of scientific instruments, v. 72, n. 1, January 2001

Диагностика термоядерных протонов. Торможение протонов в Si



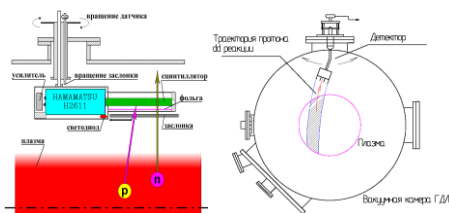
Интенсивность потока протонов пропорциональна квадрату плотности быстрых частиц.

Протоны, будучи заряженными, теряют энергию в веществе намного интенсивнее нейтронов и гамма-квантов. Продукты DD-реакции в кремнии толщиной 100 мкм теряют:

p: 400 кэВ

n: 37 кэВ

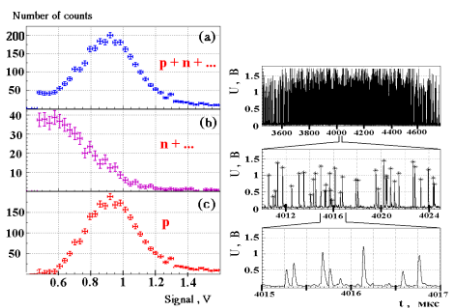
Диагностика термоядерных протонов (на примере ГДЛ)



Интенсивность сигнала от протона в сцинтилляторе или п/п детекторе на порядок выше.

Протоны могут быть отсеяны заслонкой толщиной ~1 мм.

Диагностика термоядерных протонов (на примере ГДЛ)



Измерение DD-протонов на ГДЛ

