



16  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Г.Н. Кулипанов, Ю.М. Литвинов, С.Н. Мазуренко,  
М.А. Михайлов, В.Е. Панченко

ГЕНЕРАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ  
НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА Si—SiO<sub>2</sub>  
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИНХРОТРОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ

ПРЕПРИНТ 89-20



НОВОСИБИРСК

---

Синхротронное излучение (СИ), обладая такими уникальными характеристиками, как непрерывность спектра, высокая спектральная яркость в любой области спектра, высокая естественная коллимация, стабильность характеристик во времени, становится мощным инструментом субмикронной технологии и аналитических исследований [1].

Однако вследствие существенно более высокой спектральной яркости СИ, на 2-4 порядка величины превышающей спектральную яркость самых мощных рентгеновских трубок [2], при проведении, например, рентгенолитографических операций или рентгенодифракционных исследований кремниевых приборных структур существует вероятность возникновения в них радиационных повреждений. Последние непредсказуемым образом могут оказать влияние и ухудшить электрофизические характеристики этих структур уже на промежуточных стадиях их изготовления, задолго до создания готовой приборной структуры. Ранее [3] при рентгенопографических исследованиях кристаллов гадолиний—галлиевых гранатов мы наблюдали появление в них центров окраски. В другой работе [4] при исследовании влияния СИ на параметры границы раздела Si—SiO<sub>2</sub> было обнаружено, что плотность поверхностных состояний на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> возрастает с увеличением времени экспозиции. Однако, найденная зависимость изменения плотности поверхностных состояний со временем облучения не является универсальной и характерна только для данного источника СИ, используемого в конкретном эксперименте. Поэтому в работе ставилась задача исследования дозовой зависи-

мости изменения плотности поверхностных состояний на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> кремниевых МДП-структур.

Для этого проведен расчет дозы облучения, поглощенной образцом. При этом придерживались последовательности расчета согласно [5]. Сначала определяли спектральную освещенность  $A(\lambda)$ , создаваемую источником на расстоянии  $L$  от него по формуле

$$A(\lambda) \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot \text{Å}} \right] = \frac{59E^2 [\text{ГэВ}] I [\text{А}]}{\lambda [\text{Å}] L^2 [\text{м}]} \eta \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \nu^{-1} \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $E$  — энергия электронов,  $I$  — ток электронного пучка,  $\lambda_c$  — критическая длина волны,  $\eta(\lambda/\lambda_c)$  и  $\nu(\lambda/\lambda_c)$  —, соответственно, универсальные спектральная и угловая функции распределения СИ из поворотного магнита. Затем, с учетом массовых коэффициентов ослабления рентгеновского излучения бериллием,  $\mu_{\text{Be}}(\lambda)$ , и воздухом,  $\mu_{\text{в}}(\lambda)$ , в канале вывода СИ, а также коэффициентов истинного поглощения кремнием  $\mu_{\text{Si}}(\lambda)$  определяли спектральную освещенность СИ, поглощенную образцом, по формуле

$$C(\lambda) = A(\lambda) \exp\{-(\mu_{\text{Be}} t_{\text{Be}} + \mu_{\text{в}} t_{\text{в}})\} (1 - \exp\{-\mu_{\text{Si}} t_{\text{Si}}\}), \quad (2)$$

где  $t_{\text{Be}}$ ,  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{Si}}$  — толщины бериллиевых фольг, воздушного зазора между выходной бериллиевой фольгой и исследуемым образцом и исследуемого образца, соответственно.

Интегрируя (2) по всему интервалу длин волн, находим дозу облучения  $D$ , поглощенную исследуемым образцом:

$$D [\text{Рад}] = C_{\Sigma} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{кГ}} \right] T [\text{с}], \quad (3)$$

где  $C_{\Sigma}$  — интегральная освещенность, поглощенная образцом,  $T$  — время экспозиции.

Эксперименты проводили на накопителе ВЭПП-4 с параметрами:  $E=5.5$  ГэВ;  $\lambda_c=0.83$  Å;  $I=0.01$  А. В канале вывода СИ было установлено пять бериллиевых фольг общей толщиной 1 мм. Зазор воздуха между выходной бериллиевой фольгой и исследуемым образцом составлял 10 см. Методы подготовки образцов к исследованию описаны в [6], а метод измерения плотности поверхностных состояний изложен в [4]. Общая толщина кремниевой структуры Si—SiO<sub>2</sub>, составляла 380 мкм.

Рассчитанные по формулам (1) и (2), с учетом приведенных выше экспериментальных данных, зависимости освещенности со-

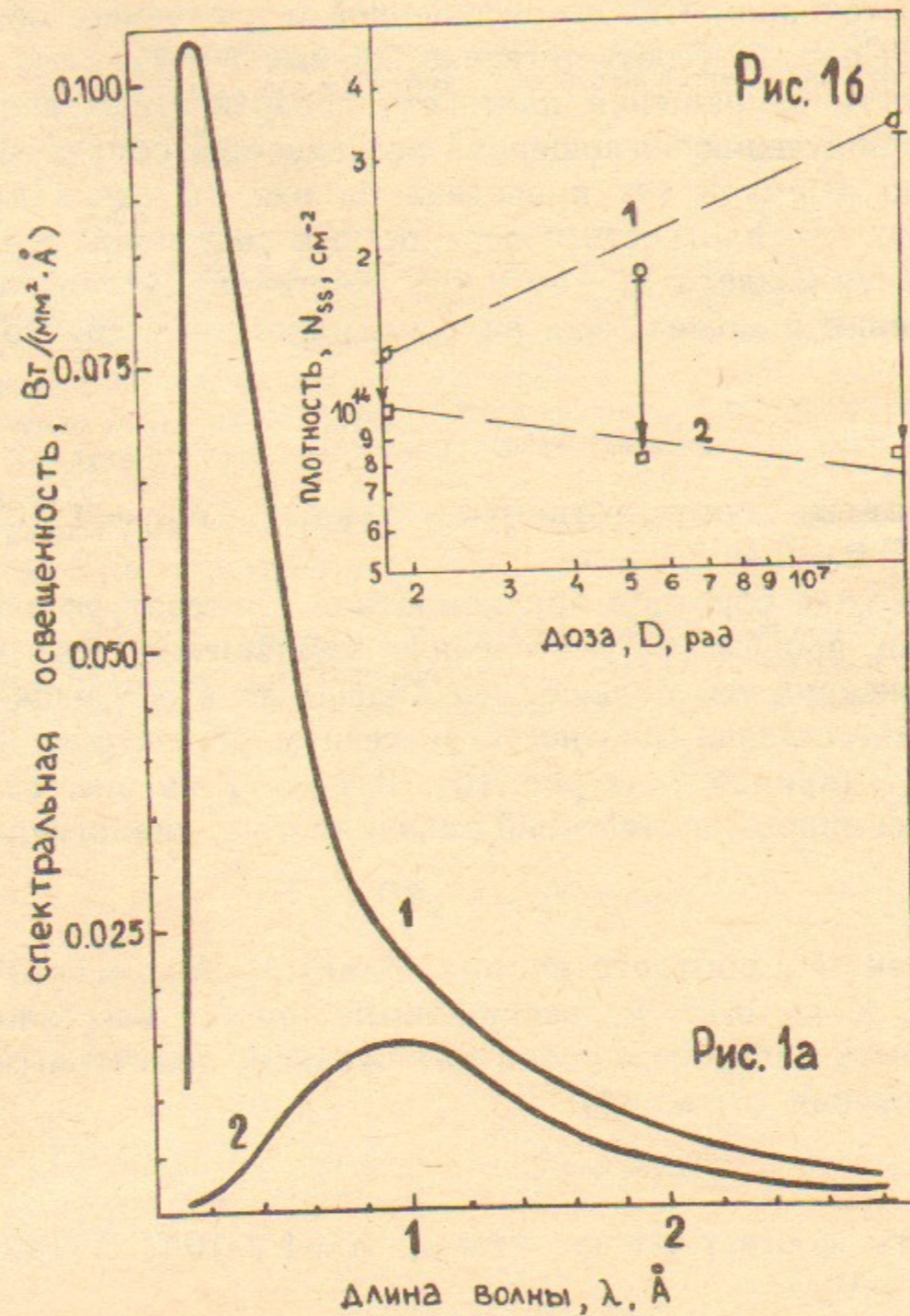


Рис. 1а. Спектральная зависимость освещенности, создаваемой источником (1) и поглощенным образцом (2).

Рис. 1б. Дозовая зависимость приращения плотности поверхности состояний,  $\Delta N_{\text{SS}}$ , измеренная непосредственно после облучения СИ (1) и после выдержки в течение двух месяцев при комнатной температуре (2).

здаваемой источником СИ и поглощенной исследуемым образцом, приведены на рис. 1а (соответственно, кривые 1 и 2).

Зависимость приращения плотности поверхностных состояний,  $N_{SS}$  от дозы облучения поглощенной исследуемым образцом и рассчитанной по формуле (3) приведена на рис. 1б (кривая 1). Из рис. 1б видно, что плотность поверхностных состояний, генерируемых на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> под действием СИ, возрастает с дозой облучения и может быть аппроксимирована степенной зависимостью:

$$N_{SS1} = N_{SS0}(1 + QD^B), \quad (4)$$

где константы соответственно равны:  $N_{SS0} = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $Q = 5.6 \cdot 10^{-2}$ ,  $B = 0.46$ .

При выдержке образцов при комнатной температуре в течение двух месяцев происходит постепенное уменьшение  $N_{SS}$ . Причем степень релаксации тем больше, чем больше доза облучения и чем больше, соответственно, плотность внесенных облучением повреждений —  $\Delta N_{SS}$  (кривая 2 на рис. 1б). Кривая 2 на рис. 1б может быть аппроксимирована степенной зависимостью, аналогичной (4):

$$N_{SS2} = N_{SS0}(1 + RD^K), \quad (5)$$

где константы соответственно равны:  $N_{SS0} = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $R = 1.15 \cdot 10^3$ ,  $K = -0.15$ . Релаксационный процесс восстановления  $N_{SS}$  может быть аппроксимирован выражением, получаемым вычитанием выражения (5) из (4):

$$\Delta N_{SS} = G(SD^\kappa - 1)D^\xi, \quad (6)$$

где константы соответственно равны:  $G = 1.2 \cdot 10^{15}$ ,  $S = 4.6 \cdot 10^{-5}$ ,  $\kappa = 0.60$ ,  $\xi = -0.15$ .

Следует отметить, что полное восстановление  $N_{SS}$  наблюдали лишь при повышении температуры отжига до 150°С. Отжиг в течение 30 минут снижал  $N_{SS}$  до исходного уровня, равного  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Таким образом, показано, что воздействие СИ приводит к генерации поверхностных состояний на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub>.

Однако, кратковременный низкотемпературный отжиг восстанавливает параметры исследуемых структур до начального уровня. Тем самым показан неразрушающий характер применения СИ в субмикронной технологии и аналитических исследованиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуренко С.Н. Синхротронное излучение—инструмент субмикронной технологии и аналитических исследований.—Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1987, 4(124), с.47—57.
2. X-Ray Data Booklet. Ed. by D. Vaughan. Pub-400 Rev. Berkeley, California, 1986, p.4—14.
3. Васенков А.А., Кулипанов Г.Н., Литвинов Ю.М., Мазуренко С.Н., Михайлов М.А., Панченко В.Е. Контроль дефектов и рентгено топографические исследования материалов микроэлектроники с использованием синхротронного излучения.—Электронная промышленность, 1986, вып.3(151) с.64—66.
4. Горелик С.С., Литвинов Ю.М., Матвеев Ю.А., Минаев В.В., Михайлов М.А., Панченко В.Е. Воздействие синхротронного излучения на параметры МДП-структур—электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1986, вып.2(4а), с.III—112.
5. Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы.—Успехи физических наук, 1977, т.122, вып.3, с.369—418.
6. Kulipanov G.N., Litvinov Yu.M., Mazurenko S.N., Mikhailov M.A., Panchenko V.E., Vasenkov A.A. Topographic Exposures of Real Silicon Structures on the VEPP-4 SR Beam.—Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Research, 1987, v.A261, p.253—256.

*Г.Н. Кулипанов, Ю.М. Литвинов, С.Н. Мазуренко,  
М.А. Михайлов, В.Е. Панченко*

**Генерация поверхностных состояний  
на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub>  
под воздействием синхротронного излучения**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

---

Работа поступила 2 декабря 1988 г.  
Подписано в печать 22.02. 1989 г. МН 10062  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,7 печ.л., 0,6 уч.-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 20

---

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*