

## КВАНТОВЫЙ РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В АМОРФНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

С.А. Крюков, А.Ф. Плотников, Ф.А. Пудонин, В.Б. Стопачинский

*Наблюдался размерный эффект в структурах Si-SiO<sub>2</sub>, проявляющийся в изменении оптической ширины запрещенной зоны Si при толщине слоя 20 Å.*

В тонких полупроводниковых монокристаллических пленках (толщина пленки сравнима с длиной волны де-Бройля для электрона) имеет место квантовый размерный эффект, проявляющийся в изменении ширины запрещенной зоны и появлении в сверхрешетках минизонного энергетического спектра [1].

В данной работе изучались оптические свойства структур на основе Si-SiO<sub>2</sub> в диапазоне 0,36 ÷ 0,94 мкм. Структуры представляли собой подложку из стекла К8, на которую напылялись периодически чередующиеся слои Si толщиной  $h_2$  и SiO<sub>2</sub> толщиной  $h_1$ , всего K периодов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

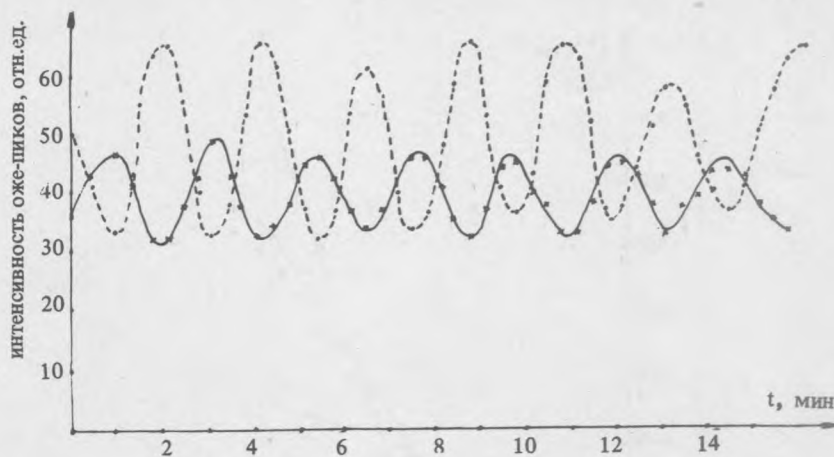
Параметры образцов

Номер образца	Толщина SiO <sub>2</sub> $h_1$ , Å	Толщина Si $h_2$ , Å	Число периодов K
1	25	20	15
2	25	60	5
3	25	80	4
4	25	100	3

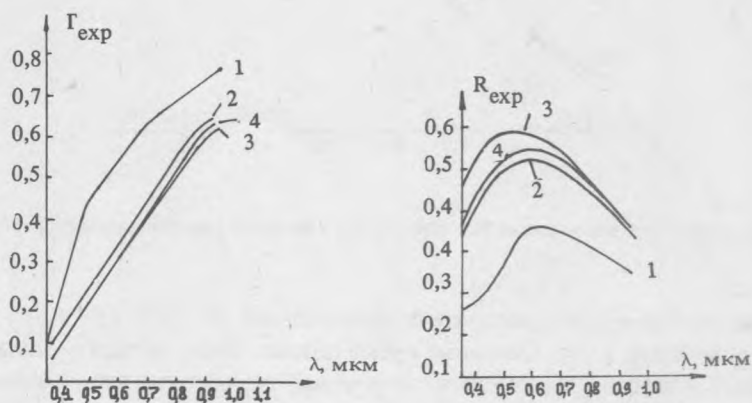
Все образцы изготовлены в одном технологическом цикле без нарушения вакуума методом ионно-плазменного ВЧ распыления на установке "Sputron II", описанной в [2]. Скорость осаждения Si равнялась 60 Å/мин, SiO<sub>2</sub> — 25 Å/мин. Благодаря хорошей воспроизводимости скорости осаждения случайные ошибки в определении  $h_1$  и  $h_2$  малы, систематическая ошибка не превышает ± 1 Å (именно она определяла точность результатов). Температура подложек во время всего процесса не превышала 70° С. Каждый слой наносился на предыдущий через 30 с. В течение всего времени изготовления образцы находились под слабым отрицательным "плавающим" потенциалом порядка 5 ÷ 10 В, что приводило к постоянному стравливанию слабосвязанных (адсорбированных) атомов и молекул с поверхности образцов. Вероятно поэтому влияние адсорбции невелико.

С помощью профильной оже-спектроскопии на установке LAS-2000 изучался состав полученных образцов. Технические параметры и подробности проведения анализа описаны в [3]. Получены зависимости интенсивности оже-сигналов чистого Si (92 эВ) и атомов Si в SiO<sub>2</sub> (78 эВ) от времени травления структуры 1 (рис. 1). Зависимости обладали хорошей периодичностью, причем в каждый момент времени присутствовали сигналы от Si 92 и 78 эВ, что объясняется наложением оже-сигналов от исследуемой пленки и сигналов от более глубоко лежащих слоев. Однако не исключено, хотя и маловероятно, и частичное окисление слоев Si.

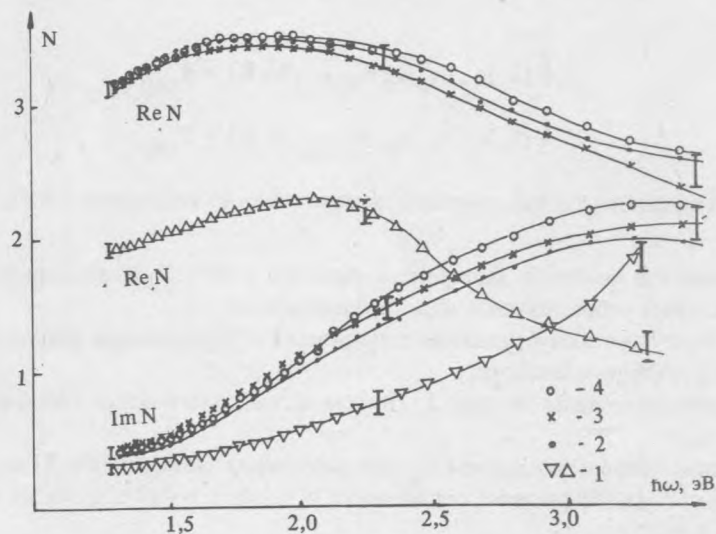
Для изучения влияния толщины Si на его оптические свойства были получены спектральные зависимости коэффициентов отражения  $R_{\text{exp}}$  и пропускания  $T_{\text{exp}}$  структур при падении света, близком к нормальному, на установке ИКСМ-31 (рис. 2).



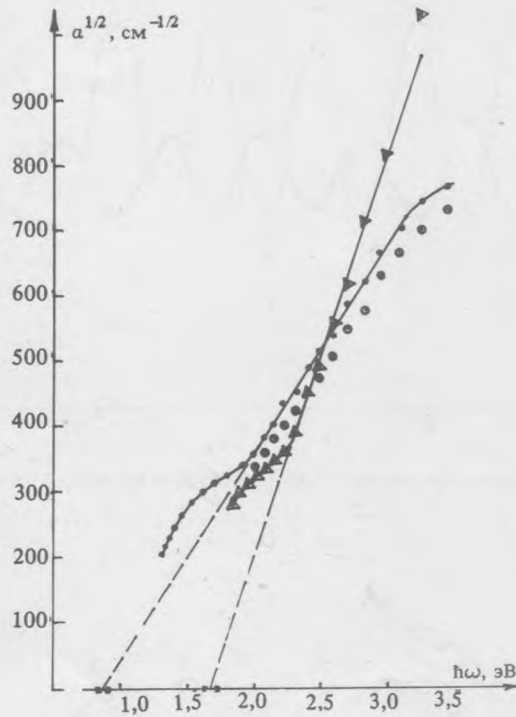
Р и с. 1. Интенсивности оже-сигналов от чистого Si, 92 эВ (пунктир) и Si в SiO<sub>2</sub>, 78 эВ (сплошная линия) в зависимости от времени травления структуры 1.



Р и с. 2. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания  $\Gamma_{\text{эxp}}$  и отражения  $R_{\text{эxp}}$  структур.



Р и с. 3. Комплексные показатели преломления кремния  $N = n(1 + ik)$  для структур с различными толщинами слоев Si (табл. 1).



Р и с. 4. Спектральное оптическое поглощение Si в структурах с различными значениями  $h_2$ : 100 Å (●), 60 Å (◻) и 20 Å (▲).

Для вычисления комплексного показателя преломления Si  $N = n(1 + ik)$  был модифицирован численный метод, описанный в /4/. Основное преимущество этого метода — малая чувствительность к качеству поверхностей и наличию переходных слоев между различными материалами.

Особенности данного варианта метода состоят в следующем.

1. Находились решения уравнений, получаемых из сравнения результатов эксперимента с численной моделью, описывающей оптические свойства структур с произвольным числом слоев /5/, а не однослойных, как в /4/:

$$R(\lambda, h_1, h_2, n_s, n_{\text{SiO}_2}, N, K) = R_{\text{exp}},$$

$$T(\lambda, h_1, h_2, n_s, n_{\text{SiO}_2}, N, K) = T_{\text{exp}}.$$

Здесь  $n_s, n_{\text{SiO}_2}$  — коэффициенты преломления соответственно подложки и SiO<sub>2</sub>; значения  $n_{\text{SiO}_2}$  были взяты из /6/.

2. Из всего множества решений выбиралось решение с  $\text{Re}N > 1$ , непрерывное по  $\lambda$  (оказавшееся единственным), остальные отбрасывались как "нефизические".

3. Учитывались многократные отражения в подложке с усреднением результата по интервалу немохроматичности спектрального прибора.

Результаты расчета приведены на рис. 3. Показаны систематические ошибки, определяемые ошибкой измерения  $h_1$  и  $h_2$ .

Оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g$  для различных толщин слоя Si определялась по графику в координатах  $h\omega$  и  $a^{1/2}$  (коэффициент поглощения  $a = 4\pi k/\lambda = 4\pi \text{Im}N/\lambda \text{Re}N$ ) экстраполяцией прямолинейного участка к  $a = 0$  (рис. 4).

Графики для образцов 4 ( $h_2 = 100$  Å) и 3 ( $h_2 = 80$  Å) практически сливаются; различие между ширинами запрещенных зон образцов 2 ( $h_2 = 60$  Å) и 4 лежит в пределах ошибки эксперимента. Для об-

разца 4  $E_g(100 \text{ \AA}) = 0,87 \pm 0,03$  эВ, что согласуется со значением 0,87 эВ [7] для аморфного кремния. Для образца 1  $E_g(20 \text{ \AA}) = 1,68 \pm 0,04$  эВ. Приближенный учет поправки к ширине запрещенной зоны Si из-за размерного квантования при толщине слоя 20 Å дает оценку  $\sim 1$  эВ, по порядку величины соответствующую полученному значению  $E_g(20 \text{ \AA}) - E_g(100 \text{ \AA}) = 0,81$  эВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Силин А. П. УФН, 147, 485 (1985).
2. Пудонин Ф. А., Селезнев В. Н., Токарчук Д. Н. Микроэлектроника, 7, 283 (1978).
3. Зандерна А. Методы анализа поверхностей. М., Мир, 1979, с. 342.
4. Nestell J. E., Christy R. W. Appl. Opt., 11, 643 (1972).
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Мир, 1973, с. 66.
6. Оптические материалы для инфракрасной техники. М., Наука, 1965, с. 144.
7. Zemek J., Závřetová M., Kos S. Journ. of Non-Crystalline Solids, 37, 18 (1980).

Поступила в редакцию 20 февраля 1986 г.