

©1995 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА SiO_2 - SiC ПУТЕМ АНАЛИЗА ВХОДНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОП СТРУКТУРЫ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ

П.А.Иванов, В.Н.Пантелеев, Т.П.Самсонова, В.Е.Челноков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 30 июня 1994 г. Принята к печати 11 июля 1994 г.)

Для системы диэлектрик-(широкозонный полупроводник) модифицированы известные методики исследования поверхностных состояний с квазинепрерывным распределением по энергиям в запрещенной зоне полупроводника. В основу положен анализ характеристик МОП структуры типа емкость-напряжение и проводимость-напряжение, измеряемых на фиксированной частоте (1 кГц) в температурном интервале 296–580 К. Проведено исследование поверхностных состояний в системе SiO_2 -(*n*-6H-SiC) с ориентацией (0001) Si. Показано, что поверхностные состояния с энергиями в верхней половине запрещенной зоны 6H-SiC имеют низкое сечение захвата электронов ($\approx 10^{-17}$ см²) и поэтому могут считаться акцептороподобными. Минимум плотности состояний ($D_i^{\min} = 2 \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹см⁻²) приходится на энергию 0.4 эВ ниже дна зоны проводимости, однако плотность состояний возрастает в несколько раз при приближении как к дну зоны проводимости, так и к середине запрещенной зоны.

Введение

Хорошо известно, что характеристики приборов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник во многом контролируются поверхностными состояниями (ПС) на границе диэлектрик-полупроводник. В исследованиях электронных состояний на поверхности раздела кремний-(термический окисел) широкое распространение получили методы исследования МОП структур, основанные на анализе их входной комплексной проводимости (входного адмиттанса). В частности, в методе Термана [1] анализируется зависимость входной емкости, измеряемой на фиксированной высокой частоте, от поверхностного потенциала. Данный метод позволяет определить только распределение

плотности ПС по энергиям в запрещенной зоне полупроводника. В методе Николлиана и Гоеццбергера [2] анализируется зависимость активной составляющей входного адмиттанса, измеряемой при фиксированной величине поверхностного потенциала, от частоты. В данном случае возможно определение как энергетического распределения плотности ПС, так и сечения захвата на них основных носителей. Важно отметить, что оба метода применимы при условии квазиравновесного заполнения поверхностных ловушек по отношению к медленным изменениям поверхностного потенциала. В частности, время перезарядки поверхностных состояний на интерфейсе $\text{SiO}_2\text{-Si}$ не превышает при комнатной температуре нескольких единиц секунд. Поэтому в случае кремния достаточно использовать указанные выше методики исследования только при комнатной температуре. Определение параметров электронных состояний на границе раздела диэлектрика с более широкими полупроводниками (в частности, с SiC) требует измерений при повышенных температурах. При этом сами методы анализа могут быть несколько модифицированы.

Методика исследования

Анализ входного адмиттанса МОП структуры, если он измерен на фиксированной частоте в некотором диапазоне температур, может быть осуществлен следующим образом. Рассмотрим простейшую эквивалентную схему МОП структуры, учитывающую наличие поверхностных состояний (рис. 1). На показанной схеме C_{ox} — емкость окисла, C_s — емкость области пространственного заряда полупроводника, C_t и G_t — зависящие от частоты емкостная и активная компоненты адмиттанса поверхностных состояний. Величины $C_t + C_s$ и G_t легко определяются в соответствии с данной эквивалентной схемой, если измерены компоненты входного адмиттанса МОП структуры (C и G) и емкость окисла (C_{ox}):

$$C_s + C_t = \frac{C_{ox}C}{C_{ox} - C} - \frac{(G_t/\omega)^2}{C_{ox}},$$

$$G_t = \frac{G}{(1 - C/C_{ox})^2}.$$

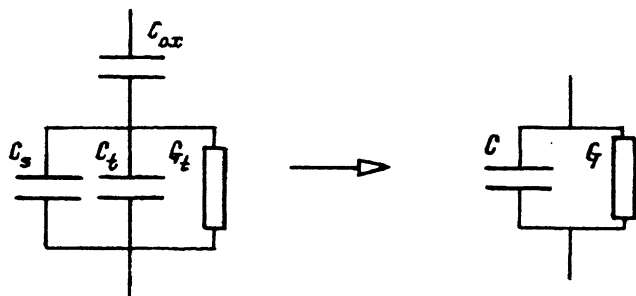


Рис. 1. Эквивалентная схема МОП структуры, учитывающая наличие поверхностных состояний, и параллельная схема ее замещения.

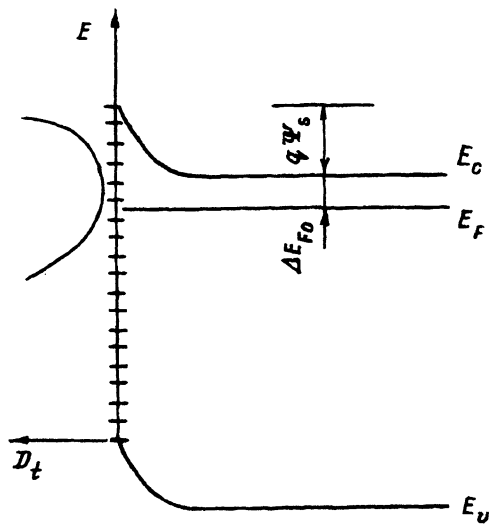


Рис. 2. Энергетическая диаграмма приповерхностной области полупроводника n -типа проводимости с квазинепрерывным распределением поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне.

Рассмотрим далее модель квазинепрерывного распределения поверхностных состояний по энергиям (рис. 2). Согласно этой модели, активная и реактивная компоненты адмиттанса ПС связаны с их энергетической плотностью D_t и сечением захвата σ_t следующими соотношениями [6]:

$$C_t = qD_t S(\arctg \Omega) / \Omega,$$

$$\frac{G_t}{\omega} = qD_t S \frac{\ln(1 + \Omega^2)}{2\Omega},$$

$$\Omega = \omega / \sigma_t v n_s,$$

где ω — круговая частота измерительного сигнала, n_s — поверхностная концентрация электронов в полупроводнике. Последняя определяется равновесной концентрацией электронов в объеме полупроводника n_0 и величиной поверхностного потенциала Ψ_s :

$$n_s = n_0 \exp(q\Psi_s / kT).$$

Безразмерная частота Ω , как видно из приведенных формул, зависит от Ψ_s , т.е. от напряжения V , приложенного к затвору МОП структуры. Проводимость ПС, нормированная на частоту (G_t/ω), проходит через максимум при некотором напряжении V , соответствующем условию $\Omega = 1.98$, т.е. при $\omega\tau = 1$, где $\tau = 1.98 (\sigma v n_s)^{-1}$ — время релаксации ПС. Это сразу позволяет определить энергетическую плотность данных ПС D_t из формулы $(G_t/\omega)_{\max} = 0.4qD_t$. Далее можно вычислить емкость ПС по формуле $(C_t)_{\max} = 1.37(G_t/\omega)_{\max}$ и емкость C_s , соответствующую напряжению V_{\max} . Определив поверхностную емкость полупроводника, становится возможным рассчитать величину поверхностного потенциала Ψ_s и сечение захвата основных носителей σ_t (по теории поверхностной емкости широкозонного полупроводника с глубокой легирующей примесью, см. [3]).

Поскольку получаемые таким образом параметры D_t и σ_t относятся к тем ПС, энергия ионизации которых $\Delta E_t = \Delta E_{Fs}$ (ΔE_{Fs} — положение уровня Ферми на границе раздела при заданном Ψ_s), от величины

$D_i(\Psi_s)$ можно перейти к $D_i(\Delta E_i)$. Для этого необходимо рассчитанному значению Ψ_s сопоставить энергию

$$\Delta E_i = q|\Psi_s| + \Delta E_{F0},$$

где ΔE_{F0} — положение уровня Ферми в объеме полупроводника. Для монополярного полупроводника n -типа величина ΔE_{F0} является решением уравнения электронейтральности

$$n_0 = N_c \exp(\Delta E_{F0}/kT) = \frac{N_d}{1 + 2 \exp\left(\frac{\Delta E_d - \Delta E_{F0}}{kT}\right)},$$

где N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости, N_d — концентрация доноров, ΔE_d — энергия ионизации доноров. С ростом температуры соотношение $\omega\tau = 1$ будет выполняться для все более глубоких ПС. Таким образом, проводя рассмотренные экспериментальные и расчетные процедуры при разных температурах в некотором интервале, можно определить энергетическое распределение плотности ПС и зависимость сечения захвата на них основных носителей от энергии.

Экспериментальные образцы

Для измерений были использованы МОП структуры Al-SiO₂-(n -6H-SiC), исследованные ранее при комнатной температуре методом Термана [4]. Пленки 6H-SiC n -типа были выращены методом вакуумной сублимационной эпитаксии на грани (0001)Si монокристаллических пластин n -типа с удельным сопротивлением ≈ 1 Ом·см. Для окисления были отобраны пленки с концентрацией нескомпенсированных доноров $3 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Окисление проводилось при температуре 1100 °C в течение 5 ч. При этом в поток сухого кислорода (расход 500 см³/мин) вводились пары C₂H₆ так, как это делается при «хлорном» окислении кремния с целью уменьшения концентрации подвижных ионов и фиксированного заряда в окисле, а также плотности ПС. Для формирования полевого электрода на окисленную поверхность SiC напылялся слой алюминия; контактные площадки размером 0.175×0.225 мм² изготавливались фотолитографией. Омическим контактом к подложке служил никель, нанесенный ионным распылением. После изготовления МОП структуры отжигались в аргоне (с целью стабилизации свойств) при температуре 450 °C в течение 1 ч.

Экспериментальные результаты

Как было показано выше, для определения энергетического распределения плотности ПС и сечения захвата на них основных носителей достаточно в некотором интервале температур измерить на фиксированной частоте вольт-фарадные ($C-V$) характеристики и характеристики типа проводимость-напряжение ($G-V$). В настоящем исследовании с этой целью $C-V$ и $G-V$ -характеристики измерялись на частоте 1 кГц; в диапазоне температур 296–580 К. Необходимая для анализа емкость окисла измерялась в режиме аккумуляции основных носителей у поверхности полупроводника, когда $C_s \rightarrow \infty$, а $C = C_{ox}$.

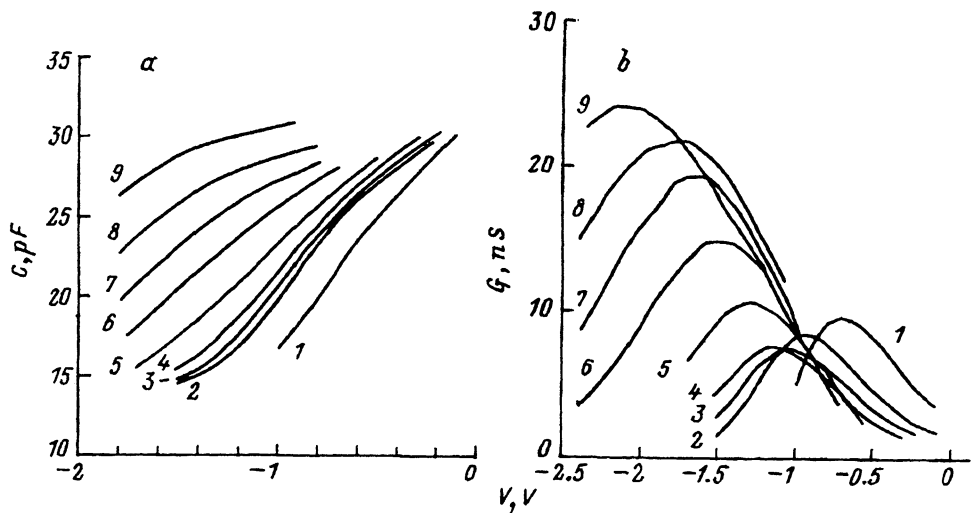


Рис. 3. Характеристики типа $C-V$ (а) и $G-V$ (б) МОП структуры $Al-SiO_2-(n-6H-SiC)$ на подложке (0001) Si, измеренные на частоте 1 кГц при температуре T , К: 1 — 296, 2 — 341, 3 — 368, 4 — 421, 5 — 445, 6 — 477, 7 — 510, 8 — 537, 9 — 580.

Рис. 4. Распределение плотности поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне $6H-SiC$. 1 — данные, полученные методом Термана при комнатной температуре [4]; 2 — данные, полученные в настоящем исследовании.

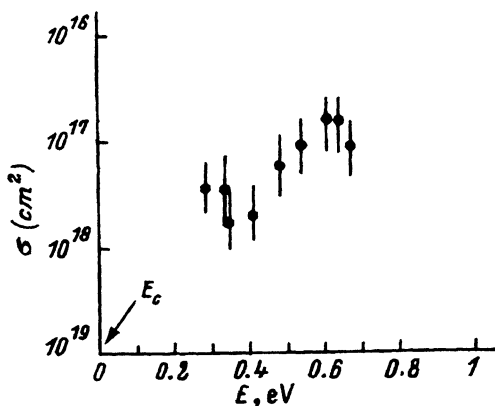
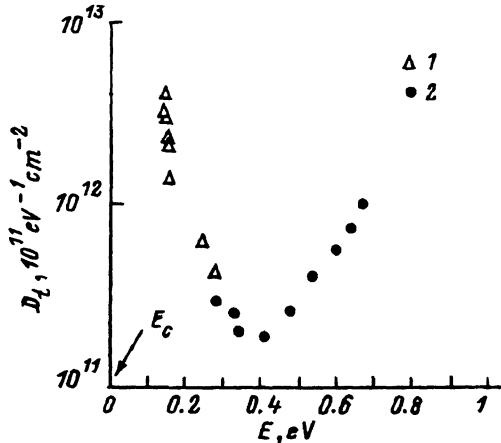


Рис. 5. Зависимость сечения захвата электронов в поверхностными состояниями от энергетического положения поверхностных состояний в запрещенной зоне $6H-SiC$.

При напряжениях, соответствующих обеднению приповерхностной области полупроводника основными носителями, $C-V$ - и $G-V$ -характеристики имеют вид, показанный на рис. 3. Качественно эти зависимости соответствуют модели квазинепрерывного распределения ПС по энергиям. В частности, $G-V$ -характеристики имеют вид кривых с максимумом, который сдвигается при увеличении температуры в сторону более отрицательных напряжений на затворе. Такое поведение свидетельствует о том, что для все более глубоких состояний выполняется соотношение $\omega\tau = 1$.

Анализ экспериментальных зависимостей по описанной выше методике дал следующие результаты. Плотность поверхностных электронных состояний с энергиями в верхней половине запрещенной зоны $6H-SiC$ изменяется немонотонно в зависимости от их энергетического положения. Минимум плотности состояний ($D_t^{\min} = 2 \cdot 10^{11} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$) приходится на энергию 0.4 эВ ниже дна зоны проводимости (рис. 4). Однако плотность состояний возрастает на порядок величины при приближении как к середине запрещенной зоны, так и к дну зоны проводимости (на рис. 4 приведены, помимо данных настоящего исследования, результаты работы [4], в которой методом Термана определено энергетическое распределение плотности ПС вблизи дна зоны проводимости). Важно отметить, что несмотря на то, что верхний предел измерений по температуре составлял 580 К, нам удалось зафиксировать лишь те поверхностные состояния, энергия ионизации которых не превышает 0.7 эВ. Причина состоит в том, что данные ловушки имеют низкое сечение захвата электронов, порядка 10^{-17} см^2 (рис. 5). По-видимому, они могут считаться акцептороподобными, т.е. отрицательно заряженными в заполненном состоянии.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства обороны США.

Список литературы

- [1] L.N. Termann. Sol. St. Electron., 5, 285 (1962).
- [2] E.N. Nicollian, A.Goetzberger. Bell. Syst. Techn. J., 46, 1055 (1967).
- [3] Л.Б. Елфимов, П.А. Иванов. ФТП, 28, 161 (1994).
- [4] П.А. Иванов, А.О. Константинов, В.Н. Пантелеев, Т.П. Самсонова, В.Е. Челноков. ФТП, 28, 1112 (1994).
- [5] П.А. Иванов, В.Н. Пантелеев, Т.П. Самсонова, А.В. Суворов, В.Е. Челноков. ФТП, 27, 1146 (1993).
- [6] В.Н. Овсяк. *Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда* (Новосибирск, 1984).

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of surface states at the SiO_2 -SiC interface by means of analysis of input admittance of MOS Structure in a wide temperature range

P.A. Ivanov, V.N. Panteleev, T.P. Samsonova, V.E. Chelnokov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

For a system dielectric-wide band-gap semiconductor, the very well known techniques of analysis of uninterface traps with continuous energy distribution within the semiconductors band-gap have been modified. The developed technique is based on the capacitance-voltage and conductance-voltage measurements at fixed frequency in a wide temperature range. Interface traps at the $\text{SiO}_2/n\text{-}6H\text{-SiC}$ (0001)Si interface have been investigated. The temperature range was from 296 K to 793 K and the frequency was 1 kHz. It has been shown that interface traps with energies in the upper half of $6H\text{-SiC}$ band-gap have low capture cross-section of electrons ($\approx 10^{-18} \text{ cm}^2$) and can therefore be considered as the acceptor ones. The minimum of the surface state density ($D_{t\text{min}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) is located at 0.45 eV below the conduction band, but it increases up to $\approx 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ towards both the mid-gap and the conduction band bottom.
