

**ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОИНДУЦИРОВАННОЙ
ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ
на границах раздела полупроводников**

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ на границах раздела полупроводников

напоминание

поле волны ВГ в точке наблюдения \mathbf{R}

$$\mathbf{E}(\mathbf{R}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{R}, 2\omega) \exp(i(2\omega t - \mathbf{k}_{2\omega}\mathbf{R}))$$

есть решение неоднородного волнового уравнения

$$\left(\nabla \times \nabla \times - (2\omega/c)^2 \varepsilon\right) \mathbf{E}(2\omega) = 4\pi(2\omega/c)^2 \mathbf{P}^{NL}(2\omega)$$

решение запишем через тензорную функцию Грина, найденную из уравнения

$$\left(\nabla \times \nabla \times - (2\omega/c)^2 \varepsilon\right) \overleftrightarrow{G}(\mathbf{R}, \mathbf{r}', 2\omega) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdot \mathbf{1}$$

в виде

$$\mathbf{E}(\mathbf{R}, 2\omega) = \int \overleftrightarrow{G}(\mathbf{R}, \mathbf{r}', 2\omega) \mathbf{P}^{NL}(\mathbf{r}', 2\omega) d\mathbf{r}'$$

Квадратичная поляризация в присутствии электростатического поля

В присутствии электростатического поля появляется добавка в квадратичную поляризацию

$$\mathbf{P}^{BD}(2\omega) = \chi^{(3)} : \mathbf{E}_\omega \mathbf{E}_\omega \mathbf{E}_0$$

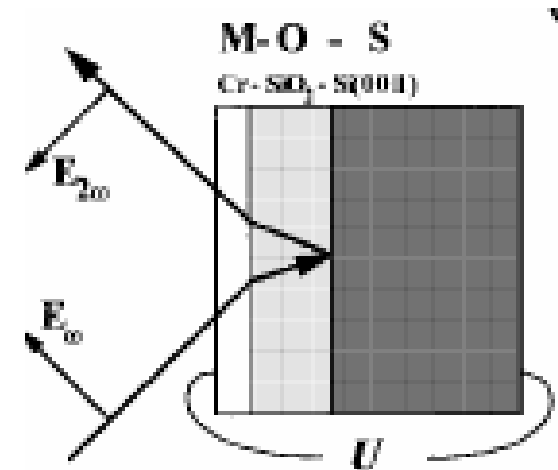
$\chi^{(3)}$ - тензор кубичной восприимчивости

\mathbf{E}_0 - напряженность электростатического поля

если $\mathbf{E}_0 = (0, 0, E_0)$

то поле ВГ, индуцированное $\mathbf{P}^{BD}(2\omega)$, имеет вид

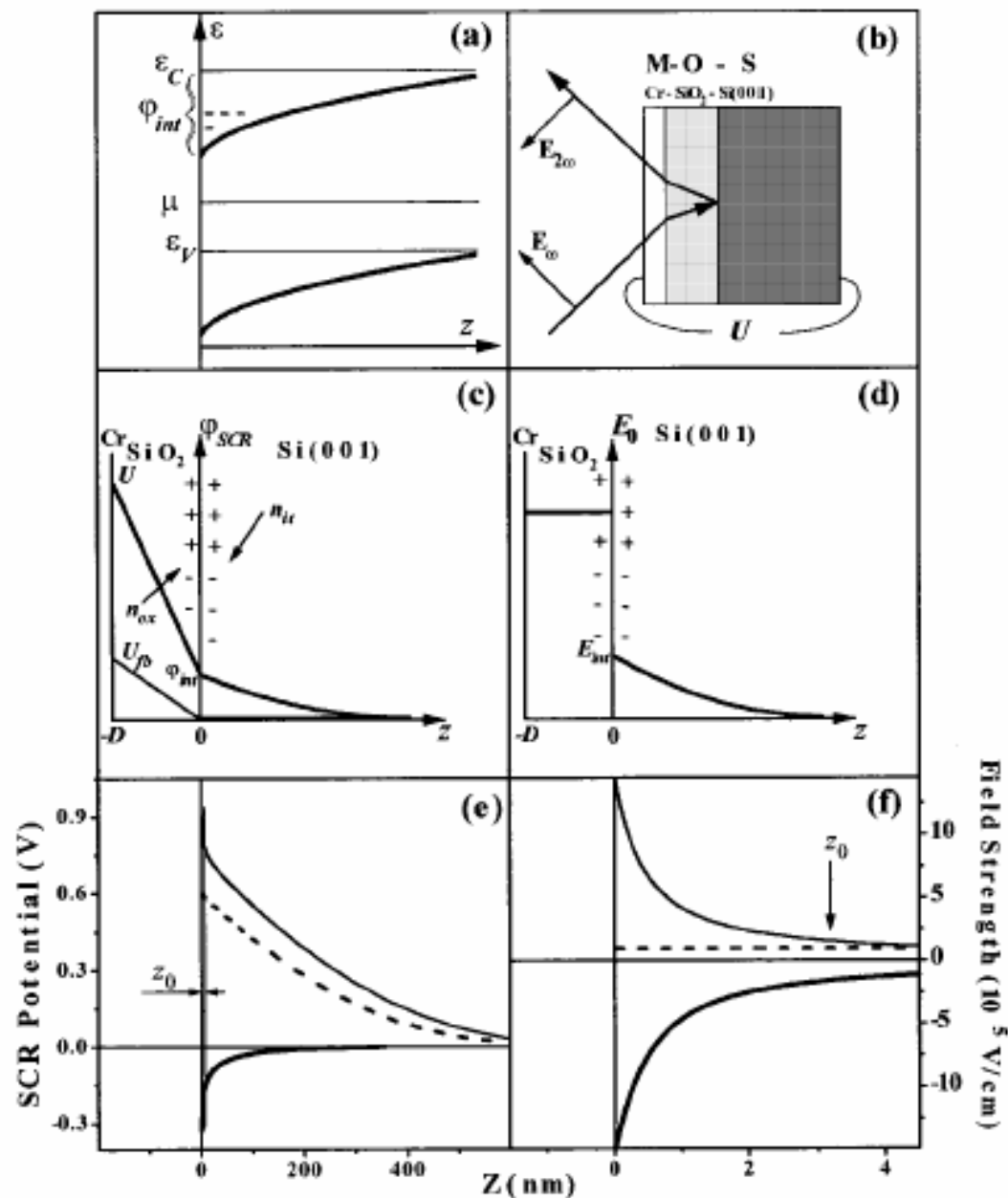
$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{BD}(\mathbf{R}, 2\omega) = & F_{2\omega} F_\omega^2 \chi_{eff}^{BD} I_\omega \mathbf{p} \exp(ik_{2\omega} \mathbf{R}) \times \\ & \times \int_0^{+\infty} E_0(z') \exp\left(i(k_{2\omega,z} + 2k_{\omega,z}) z'\right) dz' \end{aligned}$$



Изгиб зон на поверхности полупроводника в МОП структурах

режимы экранировки
электростатического поля:

- обеднение (depletion)
- инверсия (inversion)
- обогащение (accumulation)



Расчет пространственного распределения электростатического поля в МОП структурах (1)

Одномерное уравнение Пуассона

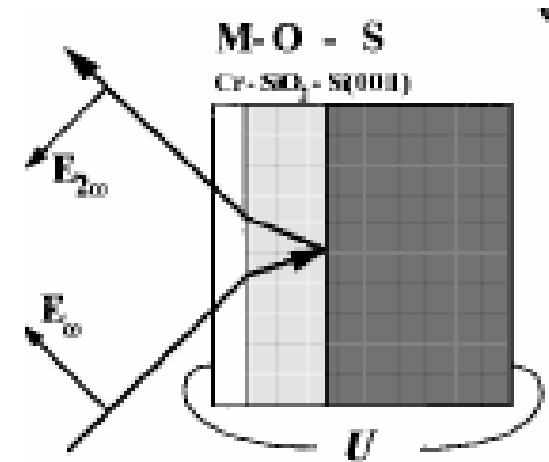
$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = -4\pi n(\varphi)$$

$$\epsilon = \epsilon_{sc}(\epsilon_d) \quad \text{-статическая диэлектрическая проницаемость полупроводника (диэлектрика)}$$

граничные условия:

$$\varphi(+\infty) = \mu,$$

$$\varphi(-D) = \mu + U$$



разделим плотность зарядов на независящие от внешнего поля и зависящие от него:

$$n = n_{fi} + n_{fd}$$

$$n_{fi} = N_D + N_A + \delta(0_-)n_{ox}$$

$$n_{fd}(z) = n_h(\varphi(z)) + n_e(\varphi(z)) + n_{it}(\varphi(z = 0_+))$$

Расчет пространственного распределения электростатического поля в МОП структурах (2)

Используя выражения для плотности состояний в валентной зоне и зоне проводимости:

$$n_{fd}(\varphi(z)) = eN_V \Phi\left(\frac{\varepsilon_V - \varphi}{kT}\right) - eN_C \Phi\left(\frac{\varphi - \varepsilon_C}{kT}\right) + \delta(0_+)n_{it}$$

$$n_{fi} = eN_C \Phi\left(\frac{\mu - \varepsilon_C}{kT}\right) - eN_V \Phi\left(\frac{\varepsilon_V - \mu}{kT}\right) + \delta(0_-)n_{ox}$$

где интеграл Ферми-Дирака

$$\Phi(\tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \sqrt{x} (1 + \exp(x - \tau))^{-1} dx$$

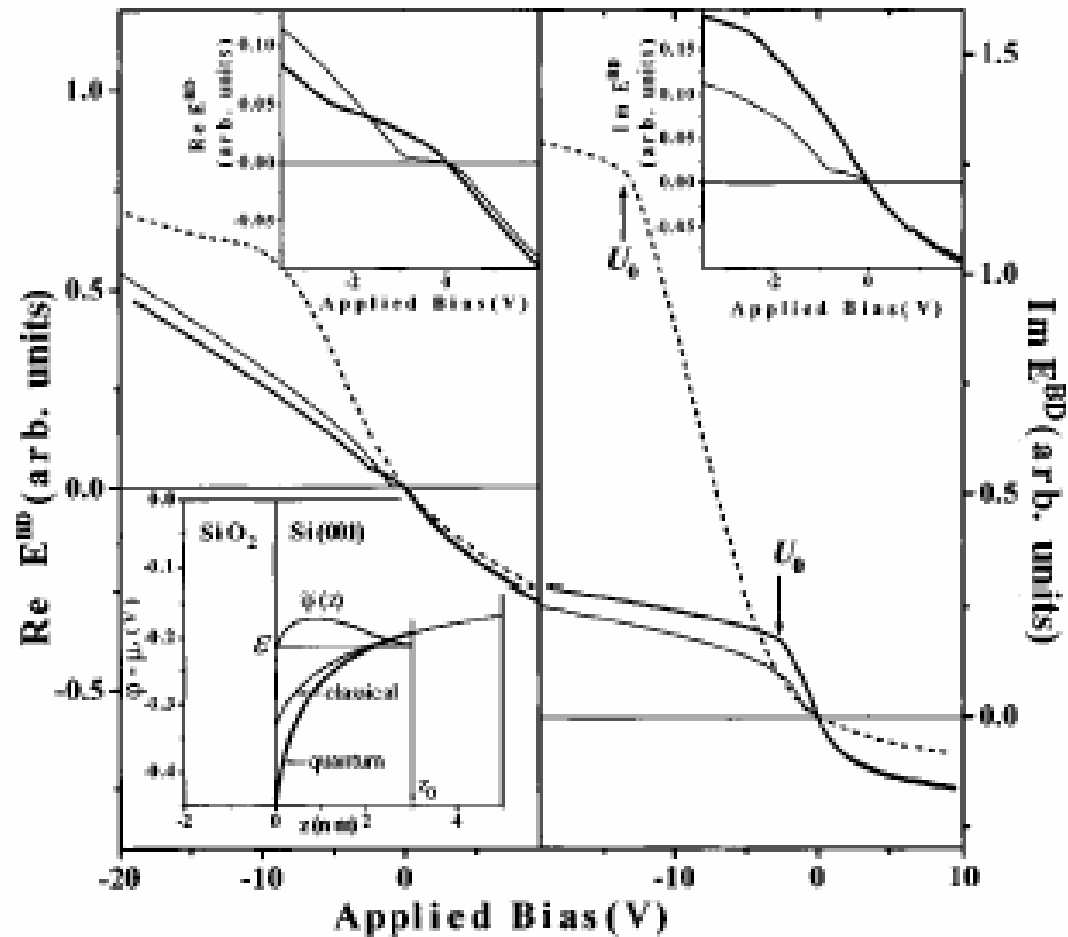
$\varepsilon_V, \varepsilon_C$ - энергии верхнего края валентной зоны и нижнего края зоны проводимости

$$N_V = 2(2\pi m_h kT h^{-2})^{3/2}, N_C = 2M_C(2\pi m_e kT h^{-2})^{3/2}$$

- эффективные плотности состояний в валентной зоне и зоне проводимости

$$E_0^2(\varphi) = \frac{8\pi}{\epsilon} \int_{\varphi}^{\mu} n(\varphi') d\varphi' \quad \text{- первый интеграл уравнения Пуассона}$$

Расчет зависимости электроиндуцированной второй гармоники от внешнего напряжения



$$U = \epsilon_{sc} \epsilon_d^{-1} E_{int}(\varphi_{int}) D + \varphi_{int}$$

Учет поверхностных состояний в генерации электроиндуцированной второй гармоники (1)

плотность ловушек (донорных и акцепторных)

$$n_{it}(\varphi) = e \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C} (N_d L^d(\varphi - \varepsilon) F^d(\varphi - \varepsilon) - N_a L^a(\varphi - \varepsilon) F^a(\varphi - \varepsilon)) d\varepsilon$$

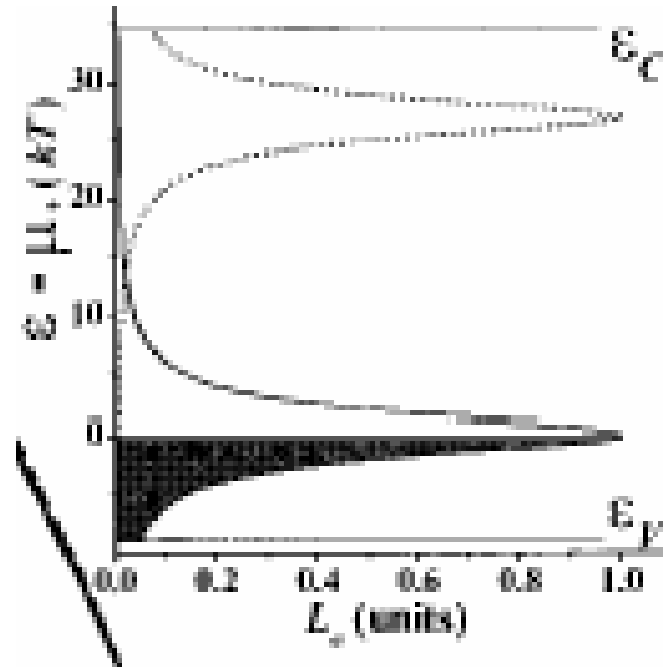
функции распределения вероятности заполнения ловушки

$$F^a(\tau) = \left(1 + \frac{1}{g^a} \exp\left(-\frac{\tau}{kT}\right) \right)^{-1}$$

$$F^d(\tau) = \left(1 + g^d \exp\left(\frac{\tau}{kT}\right) \right)^{-1}$$

энергетический спектр ловушек обычно полагается лоренцевым:

$$L_{M,j}(\varepsilon) = \delta_{M,j}^2 \left(\delta_{M,j}^2 + (\varepsilon - \varepsilon_{0M,j})^2 \right)^{-1}$$



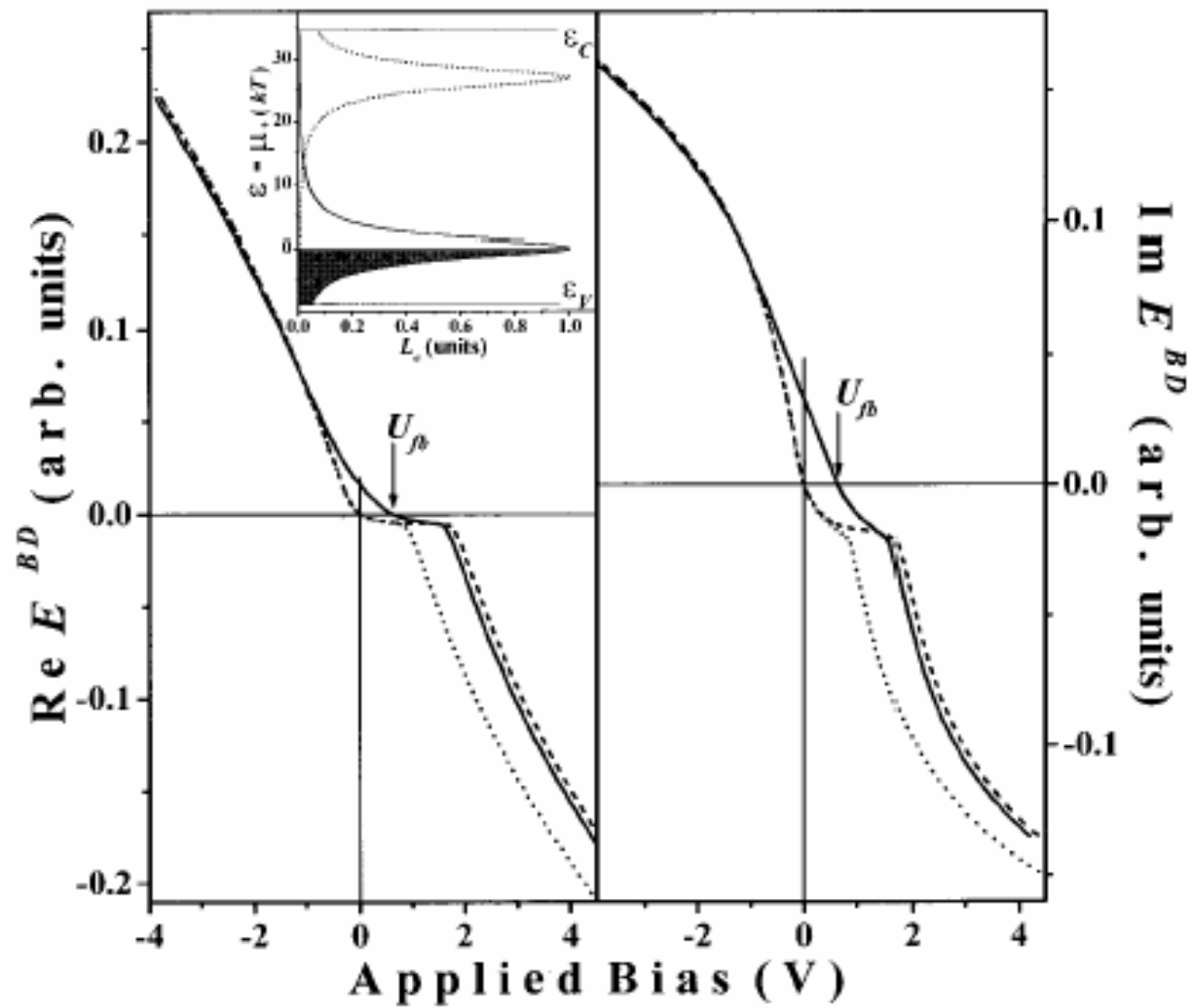
плотность ловушек

$$n_{it}(\varphi(z = 0_+)) = e \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C} d\varepsilon \sum_M \operatorname{sgn}(n_{it}^M) F^M(\varphi - \varepsilon) \sum_j N_{M,j} L_{M,j}(\varphi - \varepsilon),$$

$$M = a, d \quad N_{M,j}, \delta_{M,j}, \varepsilon_{0M,j}$$

- эффективная плотность состояний на эВ, ширина и центральное положение распределения ловушек по энергии

Учет поверхностных состояний в генерации электроиндуцированной второй гармоники (2)



Экспериментальное наблюдение генерации электроиндуцированной второй гармоники

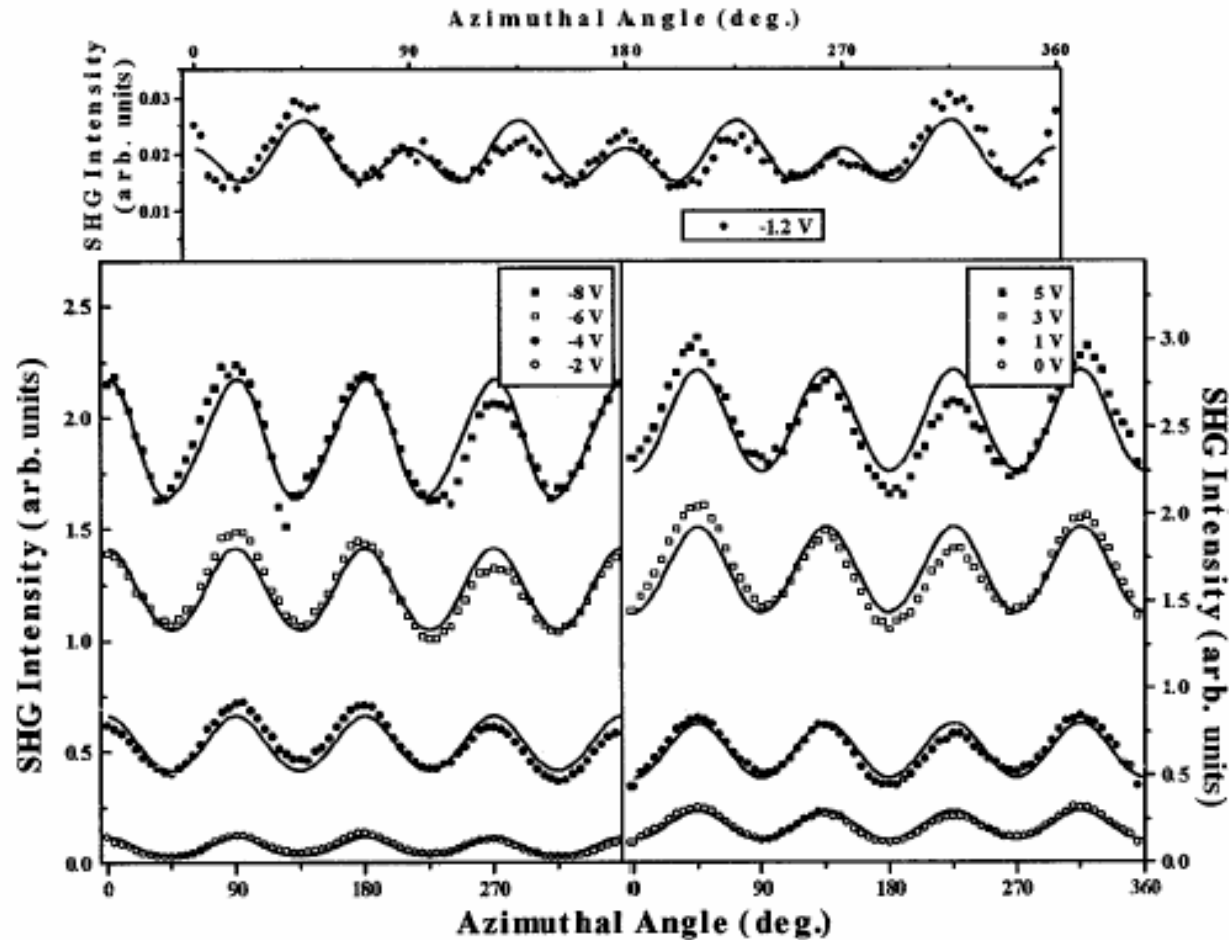


FIG. 7. *p*-in, *p*-out SHG signal from a *p*-Si(001) MOS structure at several biases for $\lambda_{\omega} = 730$ nm ($2\hbar\omega = 3.41$ eV) as a function of sample azimuthal angle. Solid curves are fits to data by the zeroth, fourth, and eighth Fourier components.

Экспериментальное наблюдение генерации электроиндуцированной второй гармоники (2)

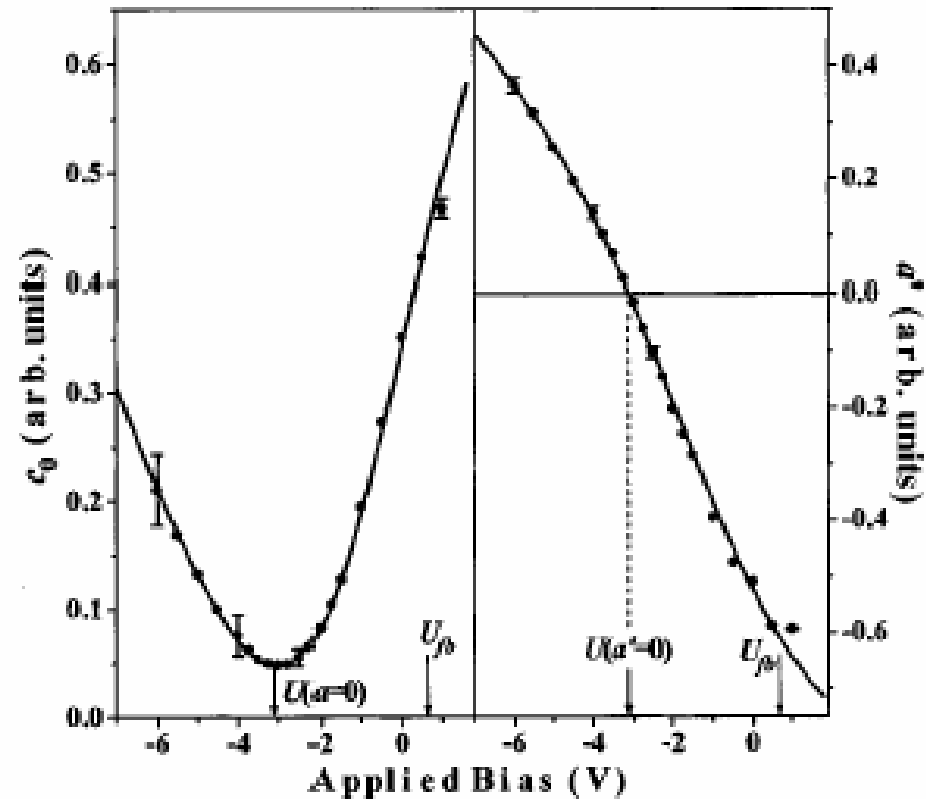


FIG. 8. Bias dependences of isotropic c_0 and normalized four-fold $a' = c_4(2\sqrt{2}c_8)^{-1}$ SHG Fourier amplitudes for n -Si(001) MOS structure for $\lambda_\omega = 725$ nm ($2\hbar\omega = 3.43$ eV). Solid curves are fits to data using the model presented.