



SOFTENING OF THE HUGONIOT AND ANOMALOUS OPTICAL EMISSION FROM SHOCK FRONT IN SILICON AT 200-500 GPa

*Nikolaev D.N., Kulish M.I., Dudin S.V., Mintsev V.B., Lomonosov I.V.,
Fortov V.E.*

IPC RAS, Chernogolovka, Russia nik@ficp.ac.ru

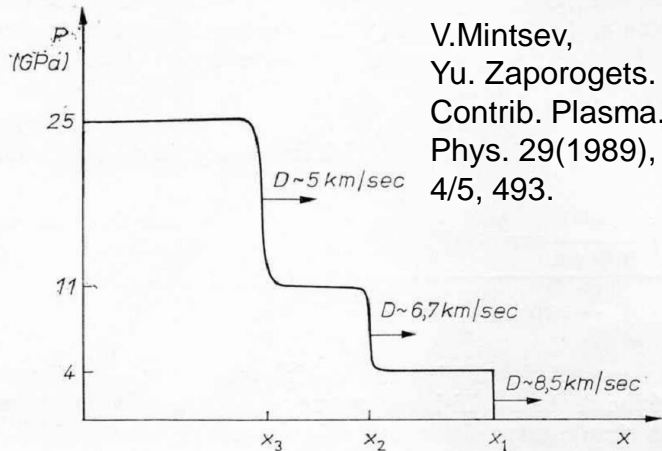
Кремний: полупроводник с шириной запрещенной зоны 1.12 eV

Прозрачен в ИК, широко используется для изготовления инфракрасной оптики

Максимальное давление ударного сжатия – **197 GPa** (Павловский, 1967)

Ударная сжимаемость не исследовалась в полусферических взрывных генераторах и в лазерных ударных волнах.

Идея: измерить температуру ударного сжатия оптической методикой в окне прозрачности в ИК-диапазоне, в стиле измерения температур в прозрачных веществах (органический жидкости, стекла, ионные кристаллы, оксиды, силикаты, и.т.д.)



V.Mintsev,
Yu. Zaporozhets.
Contrib. Plasma.
Phys. 29(1989),
4/5, 493.

Fig. 4. Shock wave structure in silicon at $P = 25$ GPa

**Металлизация
при 12.5 GPa**

**Плавление
при 65 GPa**

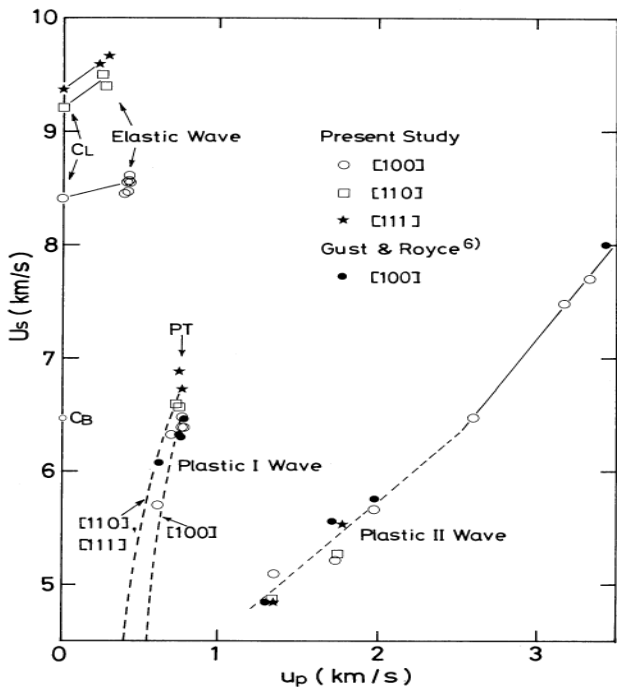
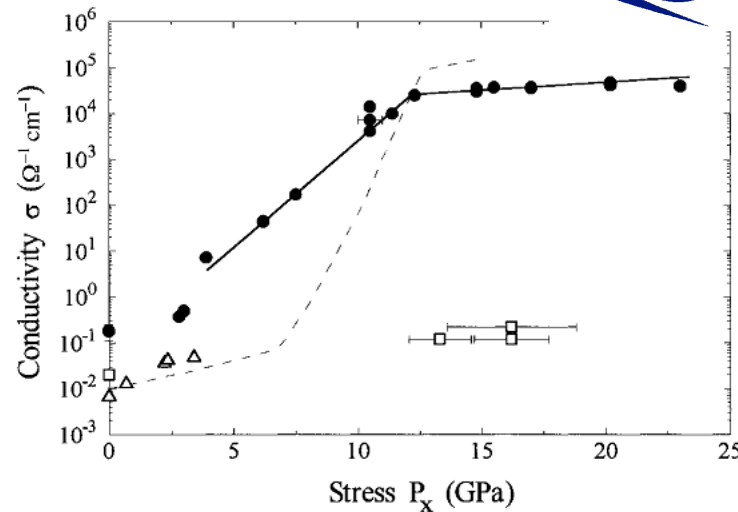


Fig. 2. U_s - u_p diagram for three orientations of Si. Two thick broken lines indicate the calculated U_s - u_p relation for the plastic I wave. The values of longitudinal and bulk sound velocities, C_L and C_B , are from McSkimin and Andreatch.^{1,11)}

**Сложная
структура ударной
волны при низких
давлениях:
отличие скорости
звука для разных
ориентаций,
упругие
предвестники и
две пластических
волны**

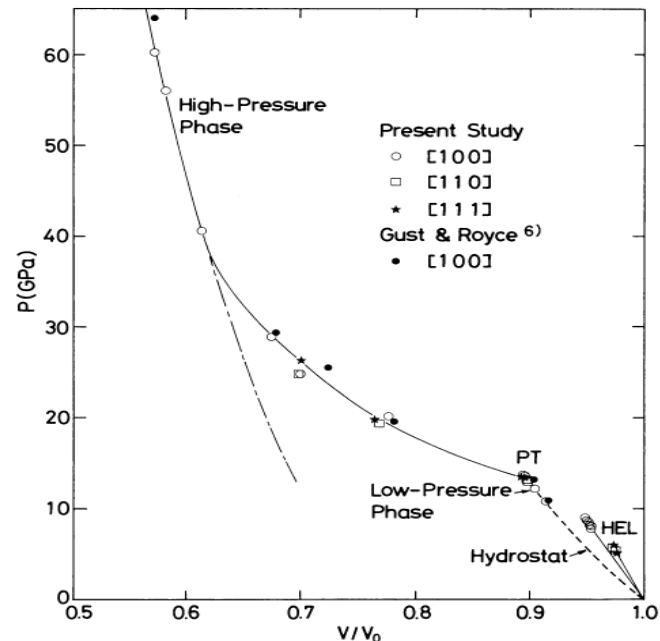
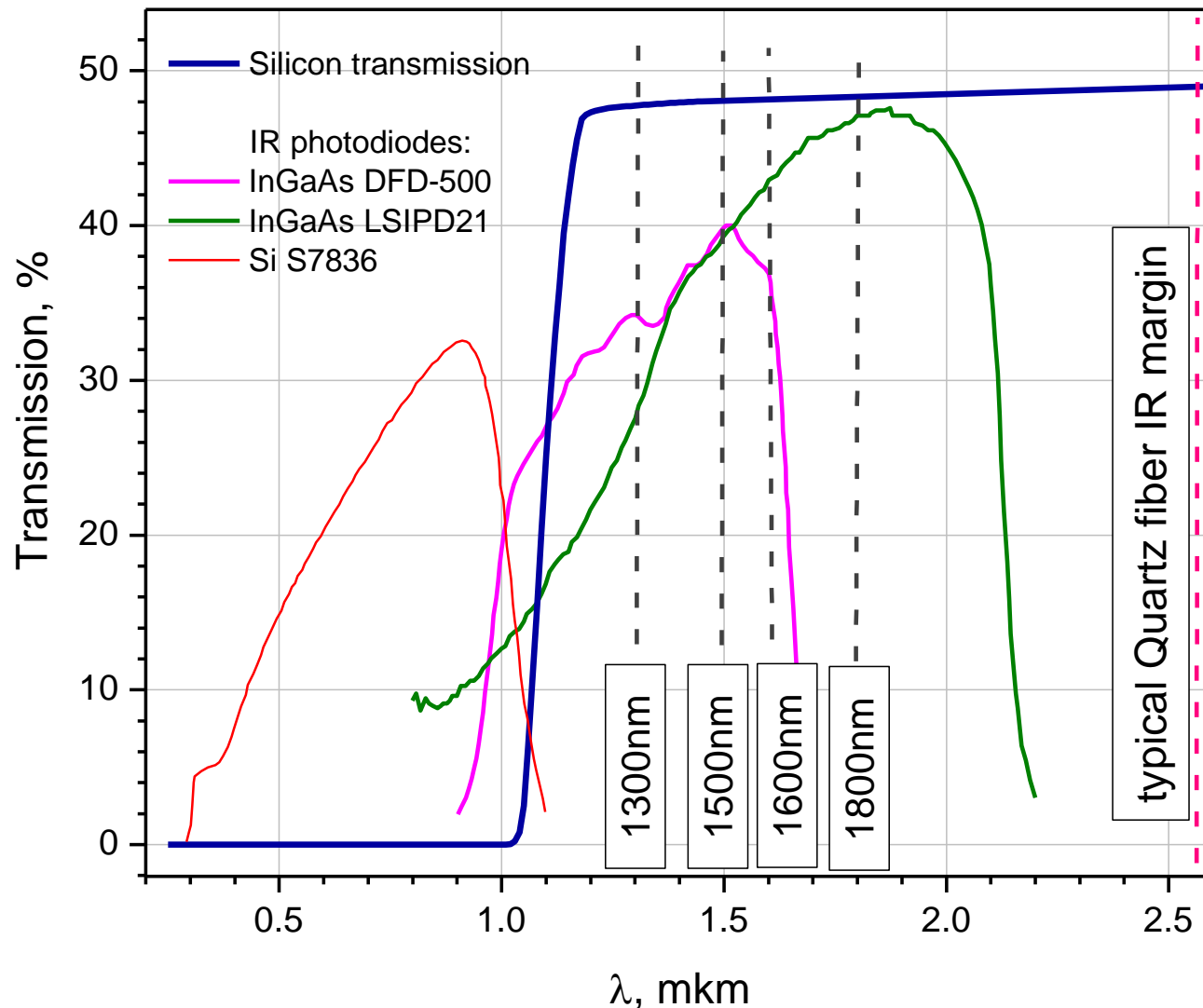


Fig. 3. Shock compression curve for three orientations of Si. The hydrostatic compression state (hydrostat) is deduced from the second-order Birch-Murnaghan equation of state with values of $K_0 = 97.9$ GPa and $K_0' = 4.2$.^{1,11)}

Оптические свойства кремния: окно прозрачности

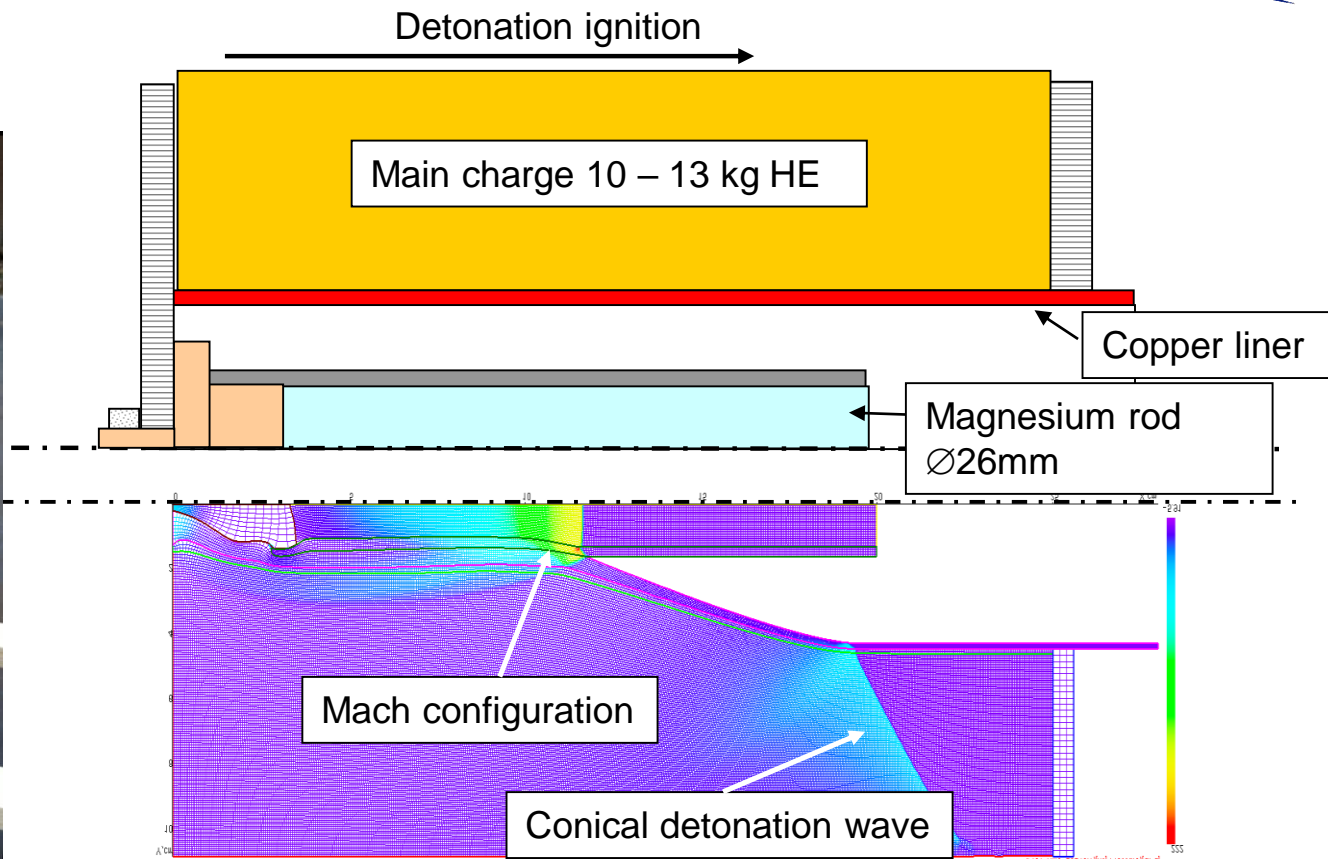
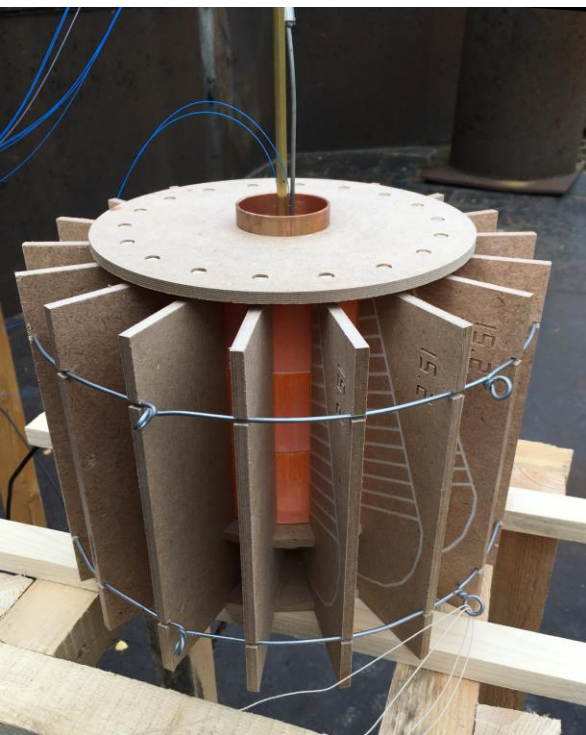


4-канальный ик-пирометр для экспериментов с кремнием

Полосы: 1300, 1500, 1600, 1800 nm.

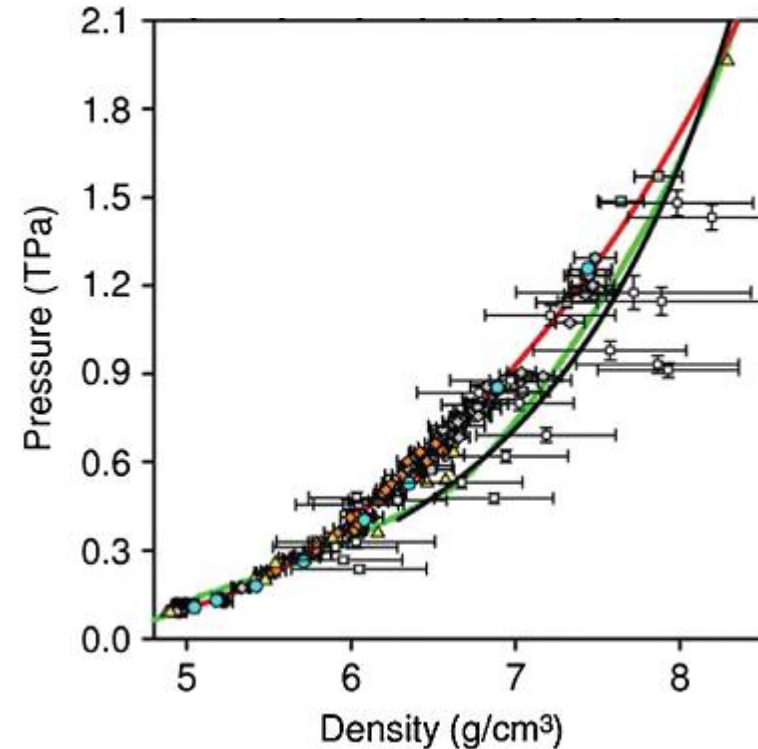
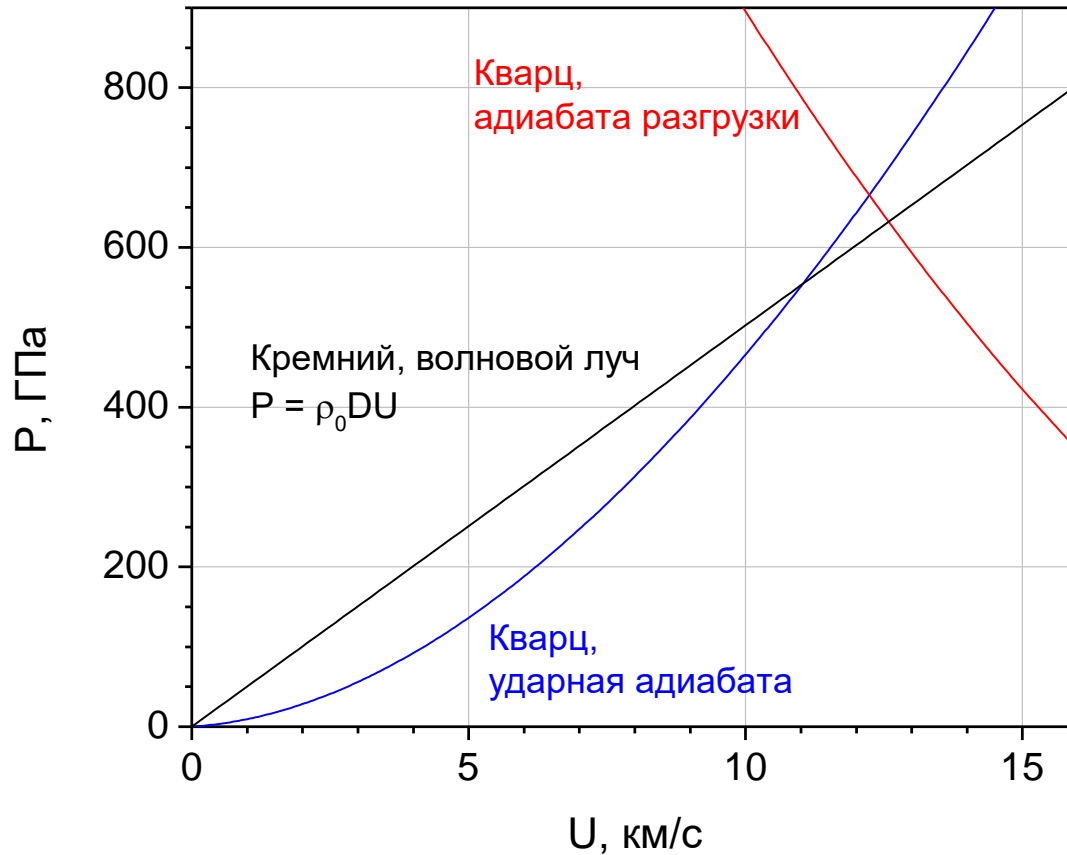
Используется кварцевое волокно и линзы – ограничение сверху 2.5 мкм

Маховский генератор ударных волн



Давление ударного сжатия кремния до 500 GPa
1-ступенчатый генератор (2012-2014). Масса ВВ: 3.9 kg и 12.5 кг.
Диаметр центрального стержня 20 mm.

Определение ударной сжимаемости: метод отражения



Красная линия: новая ударная адиабата кварца [2]. 206 точек

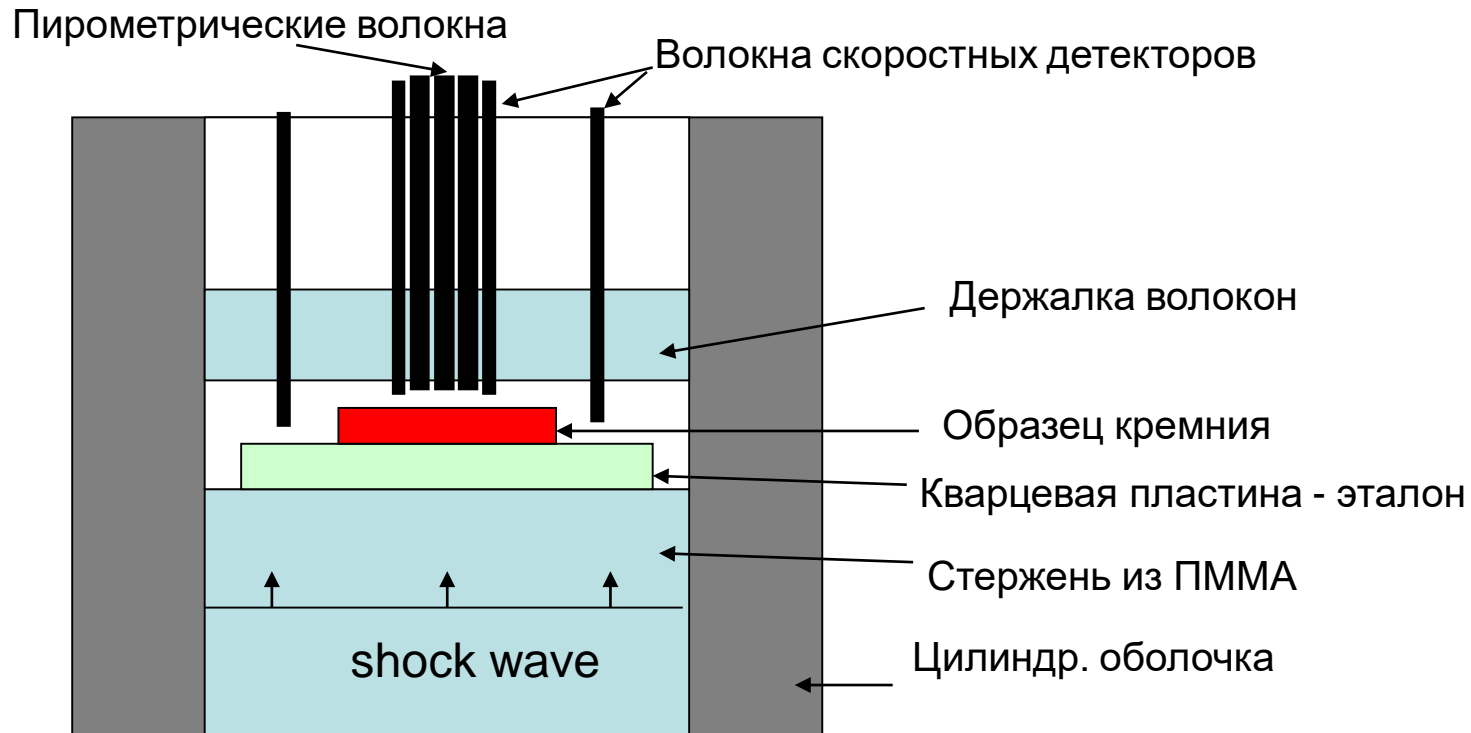
Ударная адиабата и разгрузка кварца: расчет по модифицированному УРС [1].

1. I.V. Lomonosov, A.V. Bushman, V.E. Fortov, K.V. Khishenko. Caloric equations of state of structural materials. In: High Pressure Science and Technology – 1993. Eds. S.C. Schmidt, et al. AIP Press, N.Y., 1994, Part 1. p.117 – 120.
2. D. Knudson and M. P. Desjarlais. Shock Compression of Quartz to 1.6 TPa: Redefining a Pressure Standard. Phys. Rev. Lett. 103, 225501 (2009);
3. M. D. Knudson, M. P. Desjarlais. Adiabatic release measurements in α -quartz between 300 and 1200 GPa: Characterization of α -quartz as a shock standard in the multimegabar regime. Phys Rev B 88, 184107 (2013).

Схема измерительной сборки.



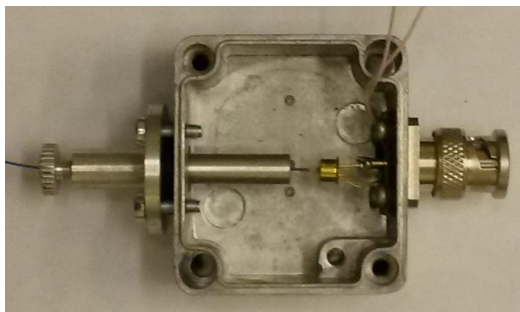
Эксперимент по схеме отражения: ударная волна из эталона переходит в образец



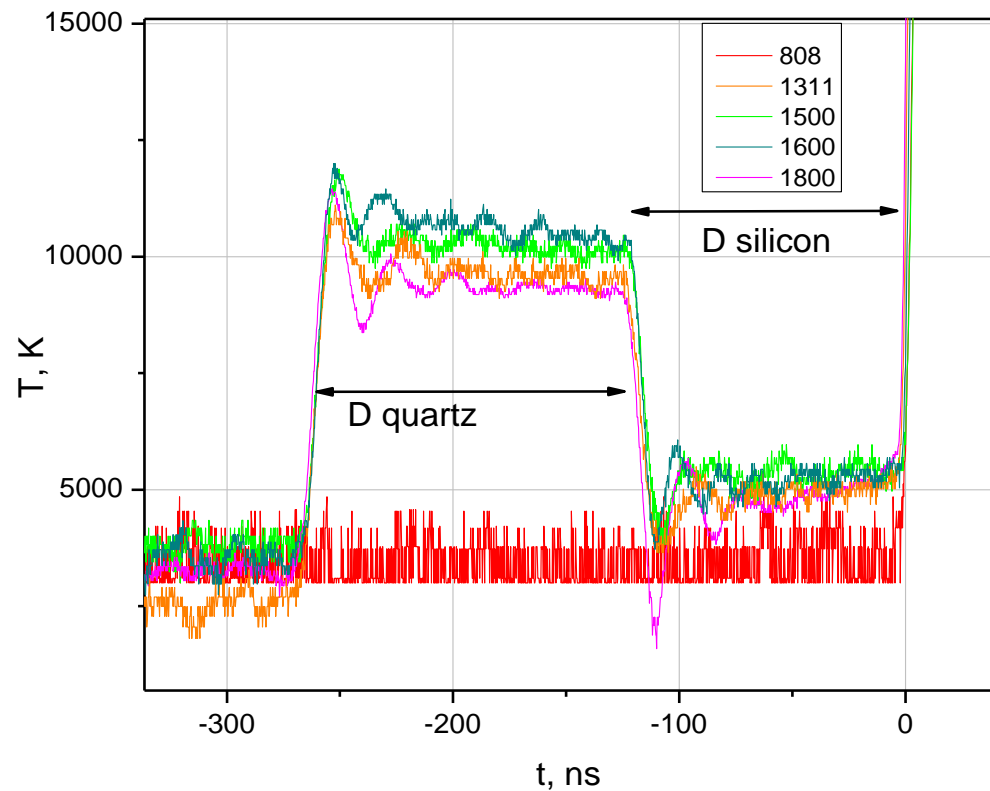
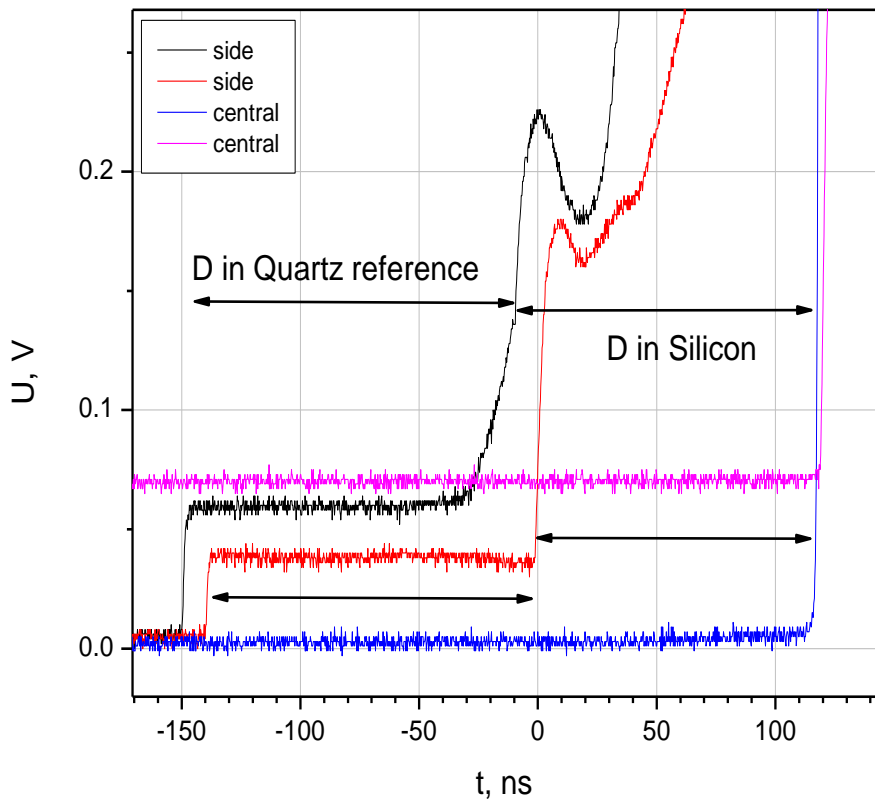
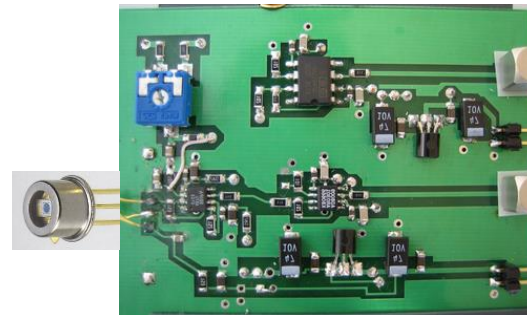
Образцы кремния: 2мм чистый не допированный
или 0.35 мм радиотехнический с электронной проводимостью

Экспериментальные сигналы

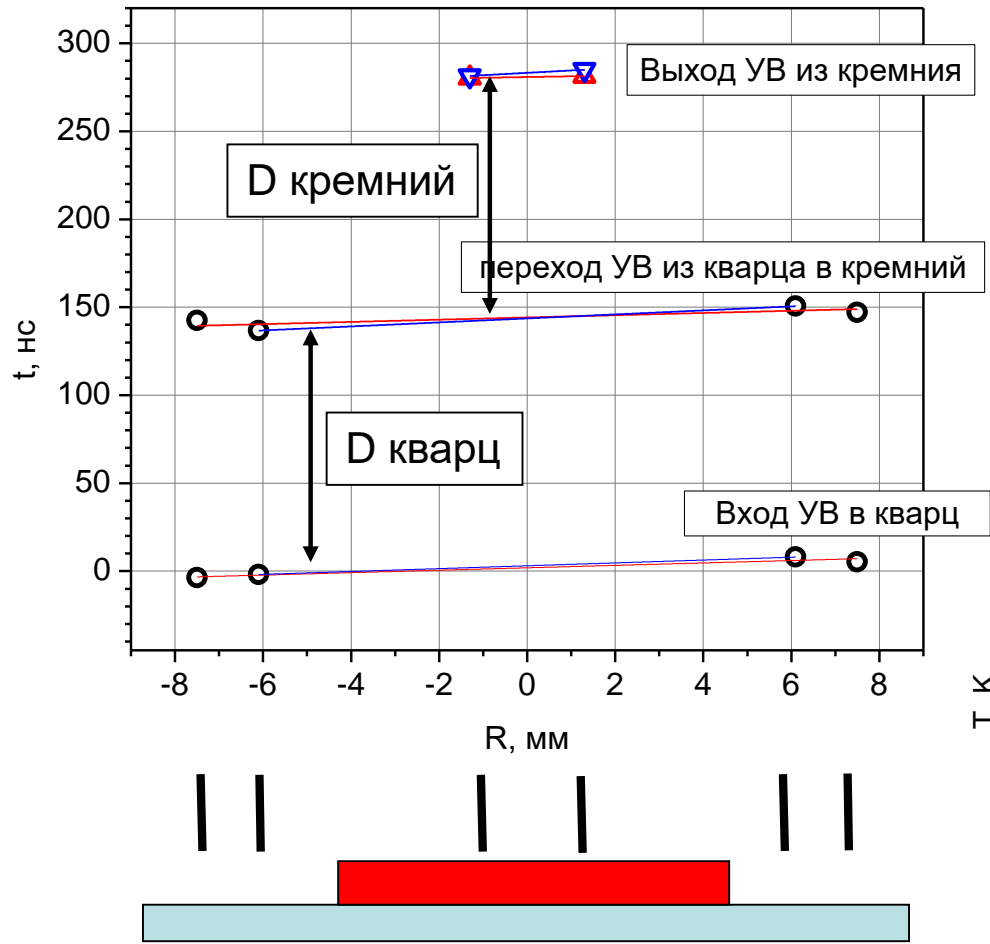
Быстрые детекторы, видимый диапазон
Разрешение около 300 пс



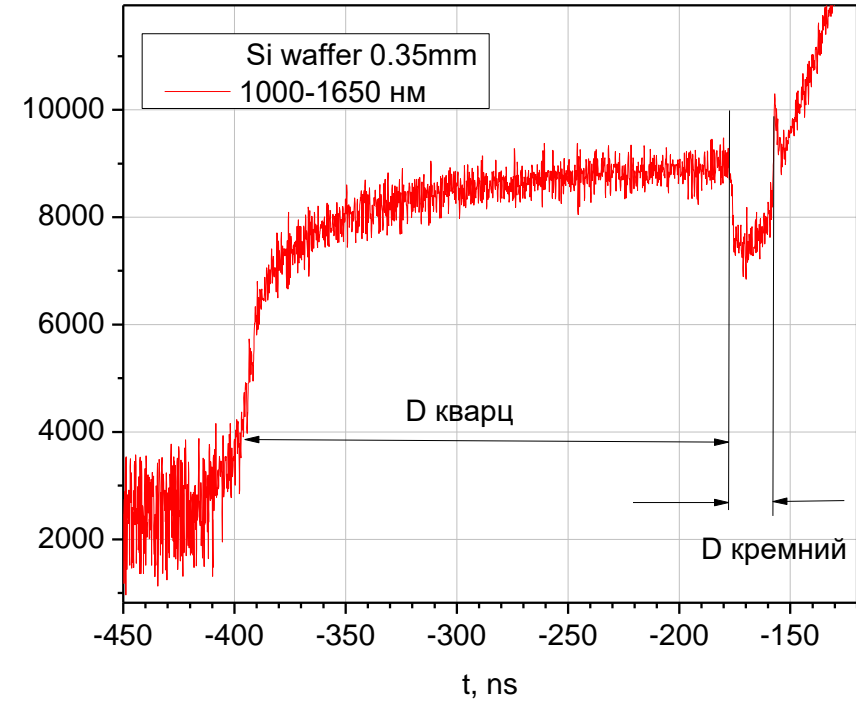
Пирометр, ик-диапазон.
Хуже временное разрешение



Обработка скоростей

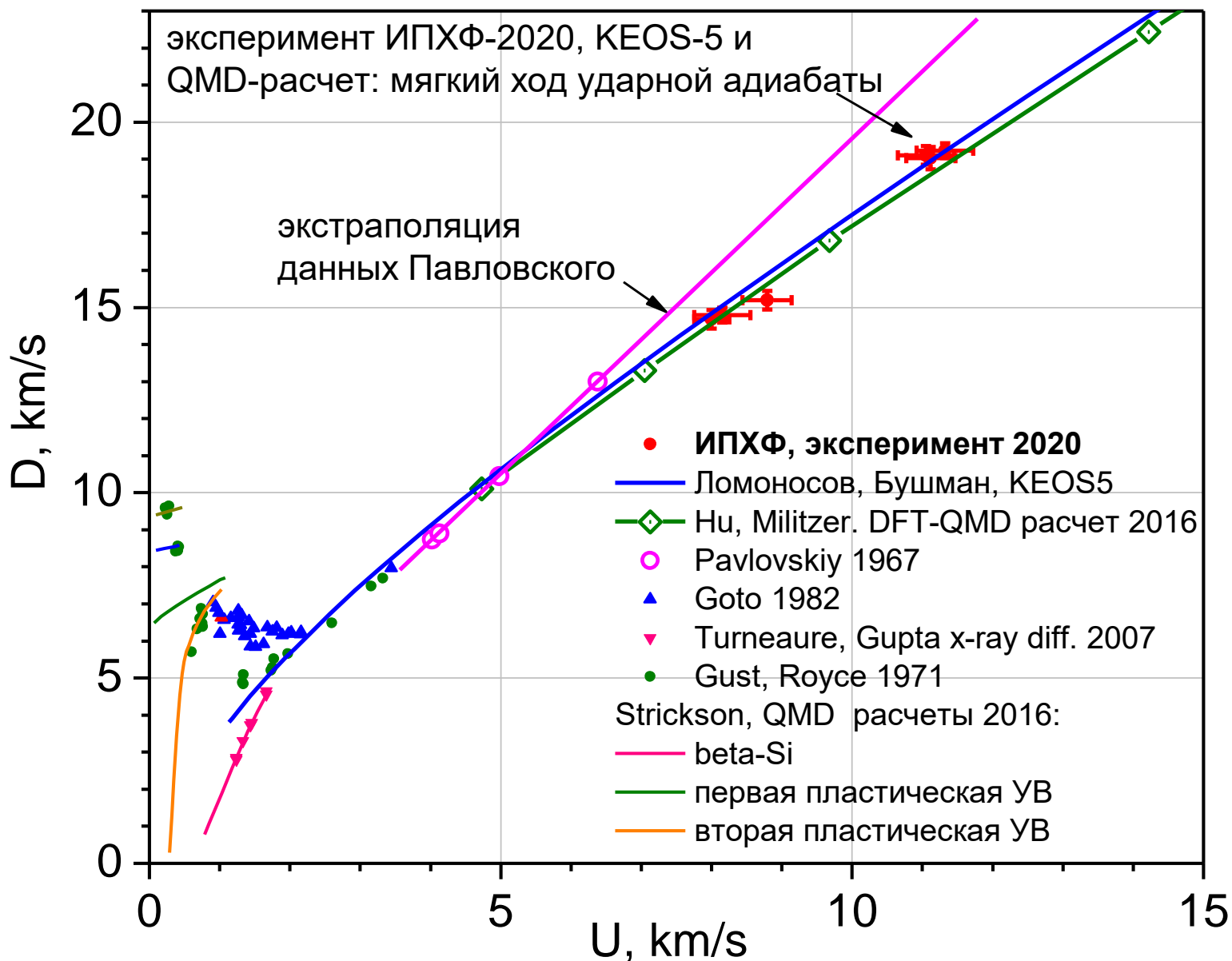


Обработка быстрых детекторов
видимого диапазона
6 детекторов



Обработка быстрого детектора
ИК-диапазона

Ударная сжимаемость кремния



1998: попытка измерить температуру в ударной волне напрямую, 6 Мбар, измерение интенсивности фотонов видимого диапазона, вылетающих с фронта УВ. Регистрация – скоростная стрик-камера. Получено 1.4 Эв при расчетной температуре 4.2 Эв.

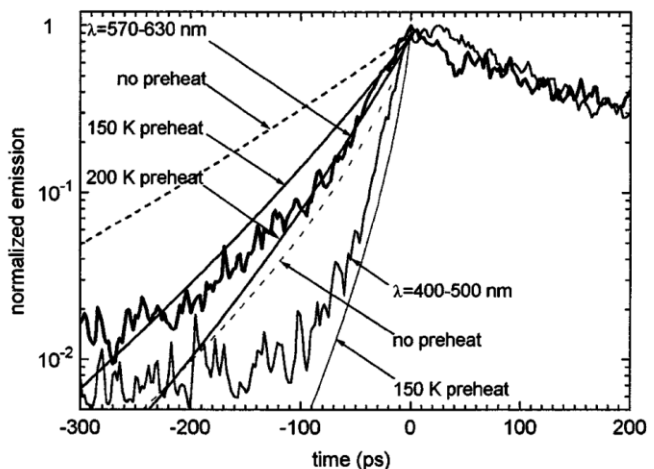


FIG. 2. Rise of optical emission signals (normalized to their peak values) in two spectral bands together with predictions for the indicated levels of preheat.

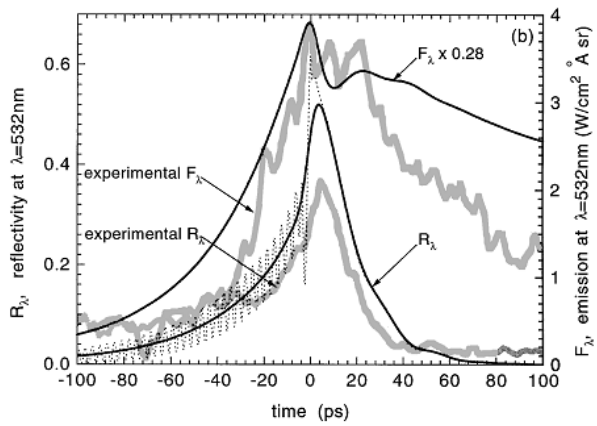
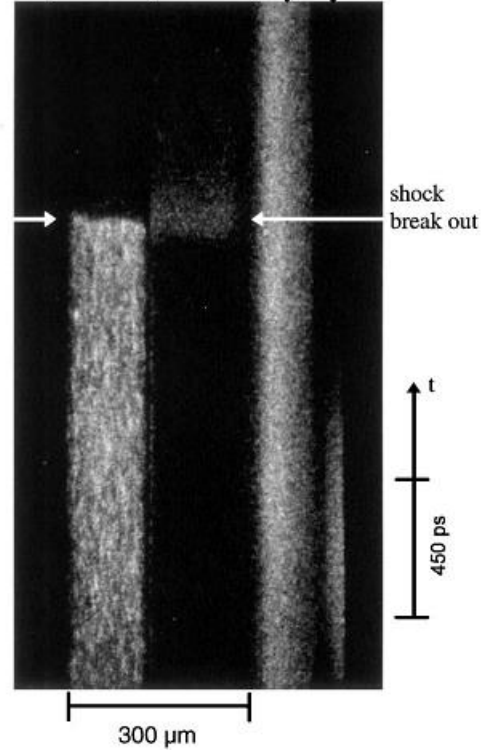
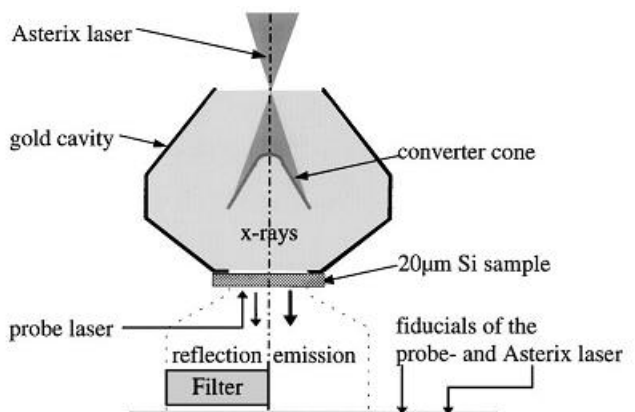


FIG. 4. (a) Structure of a 6.6 Mbar (20.7 km/s) shock wave in silicon. (b) Reflectivity R_λ (for the case with AR coating) and spectral emission F_λ (without AR coating) at $\lambda = 532 \text{ nm}$ of a 20.7 km/s shock wave as calculated with our model (solid line). The calculated signals are smoothed with a 7 ps FWHM Gaussian distribution. Unsmoothed interference fringes (dotted line) are shown for the reflection signal only. The calculated F_λ curve has been multiplied by the indicated factor. The observed

Возможное объяснение: возникновение экранирующего слоя электронов перед ударной волной при фотоионизации кремния фотонами, вылетающими из горячего фронта ударной волны.

1970-е: открыт эффект фотоионизации полупроводников лазерным импульсом
 Используется для быстрой модуляции излучения CO₂-лазера или THz волн
 При достаточной мощности лазера и плотности носителей заряда –
 зеркальное отражение

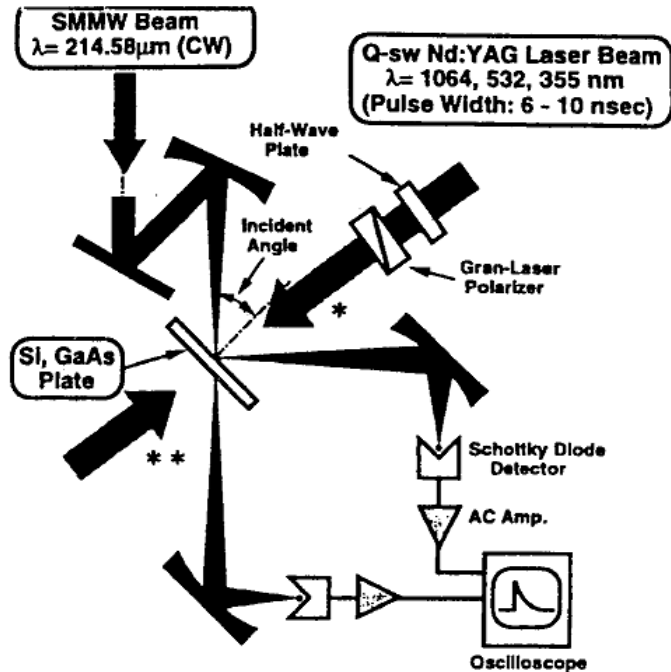


Fig. 1. Schematic of the experimental configuration.

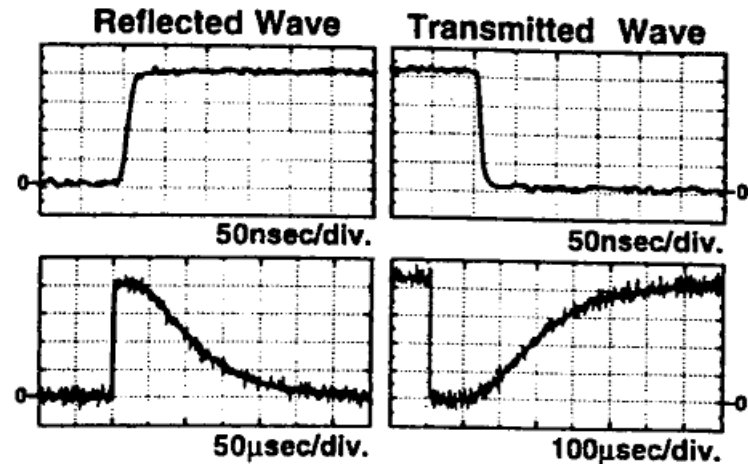


Fig. 3. Submillimeter wave (SMMW) signals measured in reflection and transmission after 1064 nm excitation.

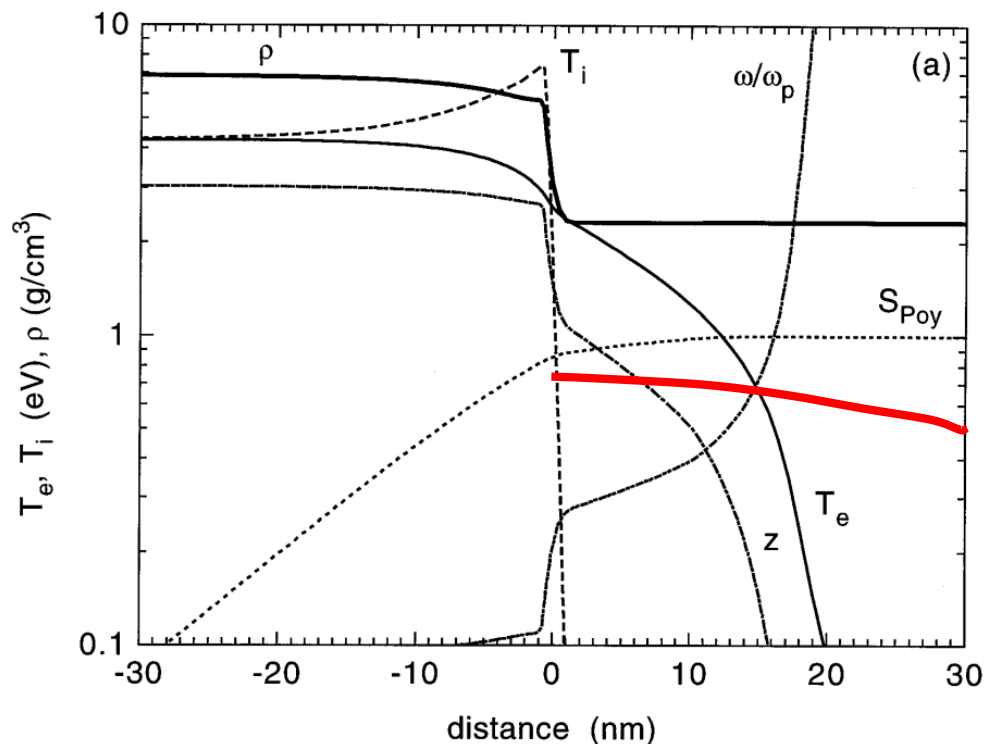


Рисунок из статьи Lower, Kondrashov 1998

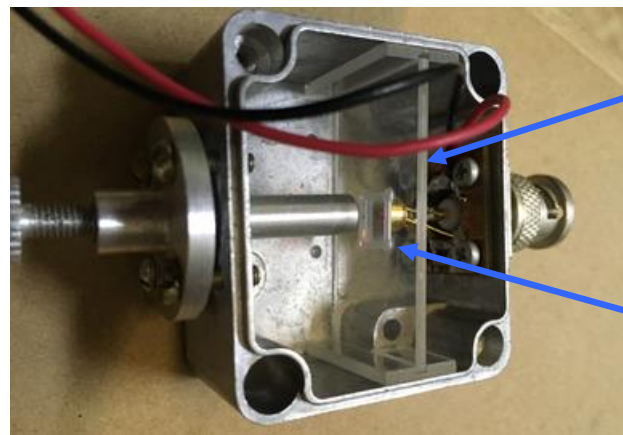
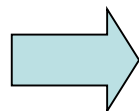
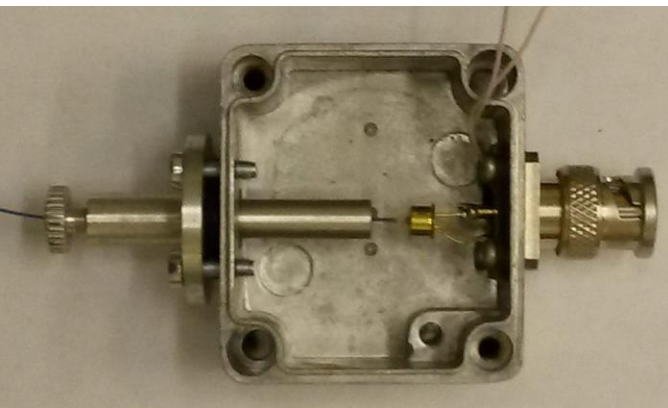
Figure 4(a) shows the structure of a 20.7 km/s shock wave in silicon as calculated with our model. Because of the electron heat conduction, the electron temperature T_e is continuous across the jump of the ion temperature T_i and density ρ . The ionization degree jumps discontinuously from $z \approx 1$ to $z \approx 3$ because the band gap closes inside the density jump (at $\rho = 3.6 \text{ g/cm}^3$). The critical density of free electrons (where the plasma frequency ω_p is equal to ω) for $\lambda = 2\pi c/\omega = 532 \text{ nm}$ occurs some 15 nm ahead of the density discontinuity in the electron precursor. The slope of the Poynting vector S_{Poy} , calculated by solving the Helmholtz wave equation for the $\lambda = 532 \text{ nm}$ probe light and normalized to its value at 30 nm ahead of the density jump, illustrates the absorptivity (hence, the emissivity) of silicon across the shock front.

Они пытались объяснить заниженную температуру (с 4.2 Эв до 1.4 Эв) электронным предвестником, возникающим из-за электронной теплопроводности. Быстрые электроны вылетают вперед фронта УВ. Их расчеты дали занижение видимой оптикой температуры до 3.6 Эв.

Фотоионизация: найдутся тепловые фотоны, испускаемые фронтом УВ с энергией, достаточной для фотоионизации ($>1.1 \text{ Эв}$), и с пробегом в холодном кремнии около микрона. Оценки пробегов: $0.26 \mu\text{m}$ at $\lambda = 430 \text{ nm}$ и $1.6 \mu\text{m}$ at $\lambda = 570 \text{ nm}$. Таким образом, поглощающий слой имеет толщину не 20 нм, а на 2 порядка больше, 1-2 мкм.

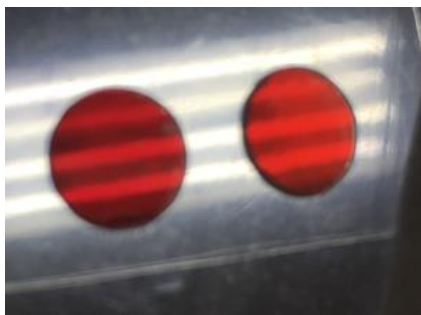
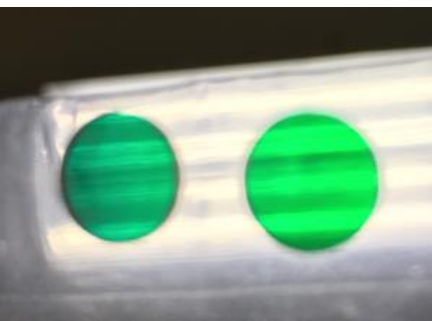
Температура занижается с 40000К до 10000К

4-канальный быстрый пирометр



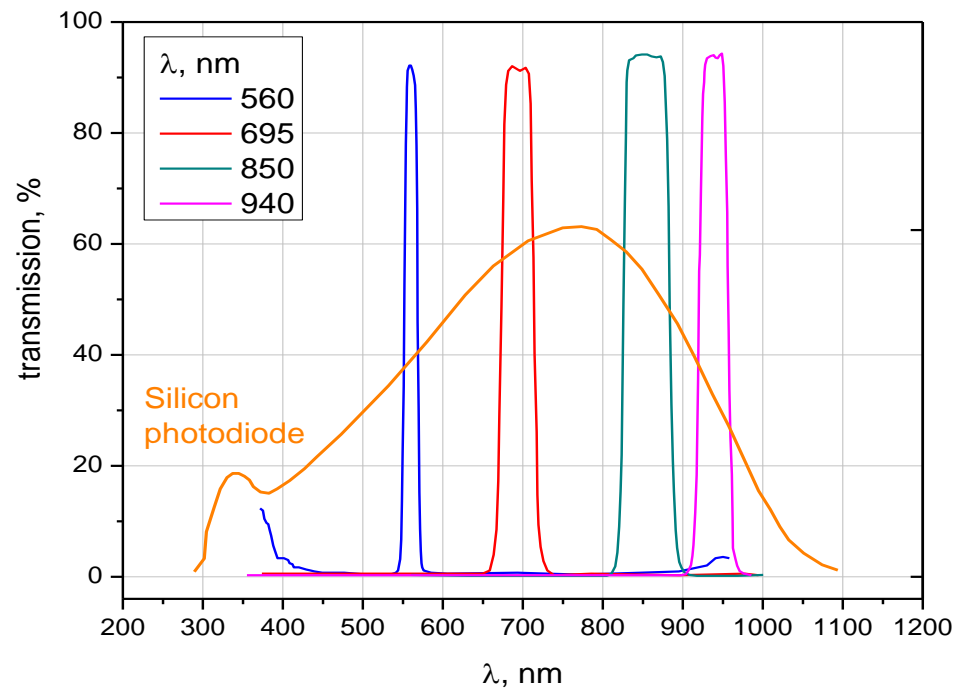
держатель
интерфильтра

интерфильтр



Интерфильтры

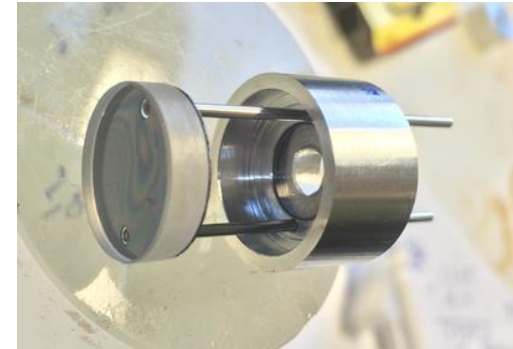
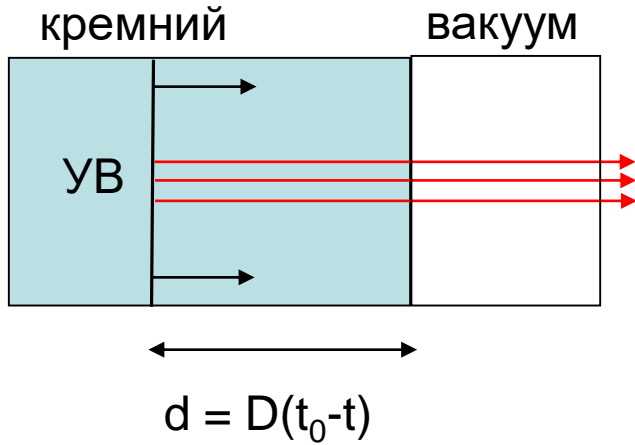
толщина 0.5 – 1 мм.
размеры 8x8 или \varnothing 10мм



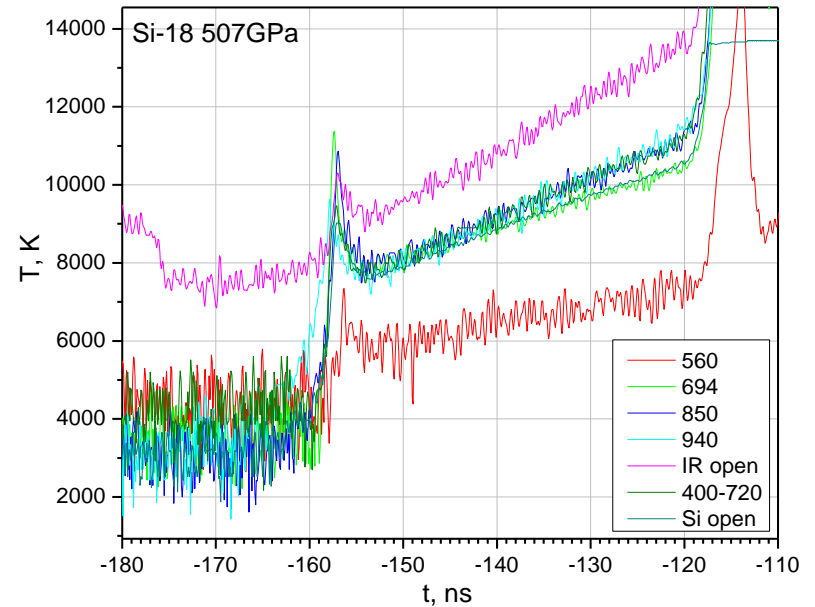
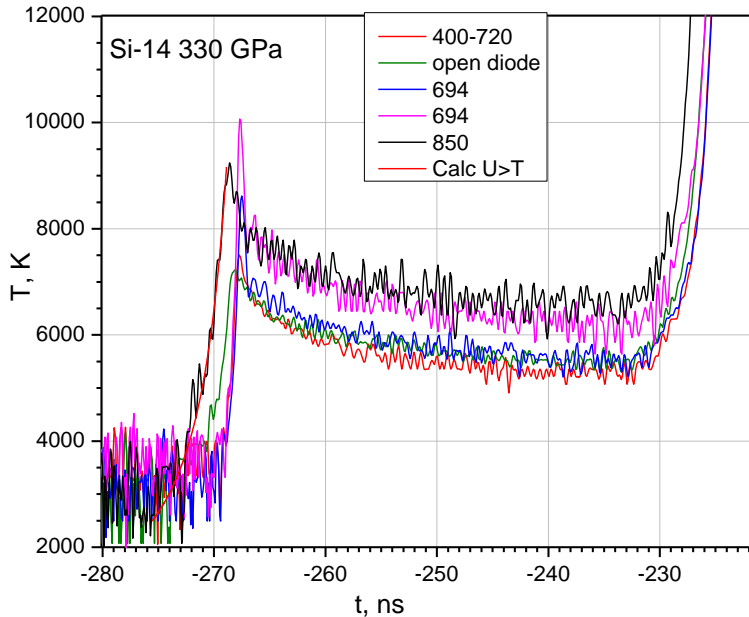
Установлены между торцом световода и сферической линзой на фотодиоде. Полосы 560, 694, 850, 940 нм

Разгрузка в вакууме

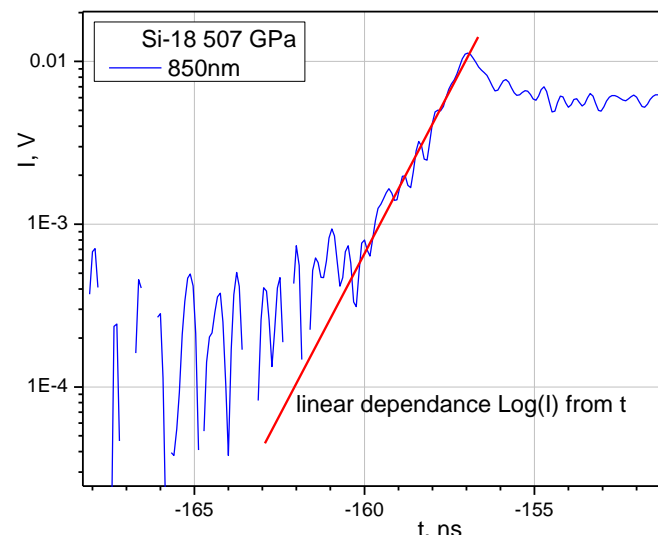
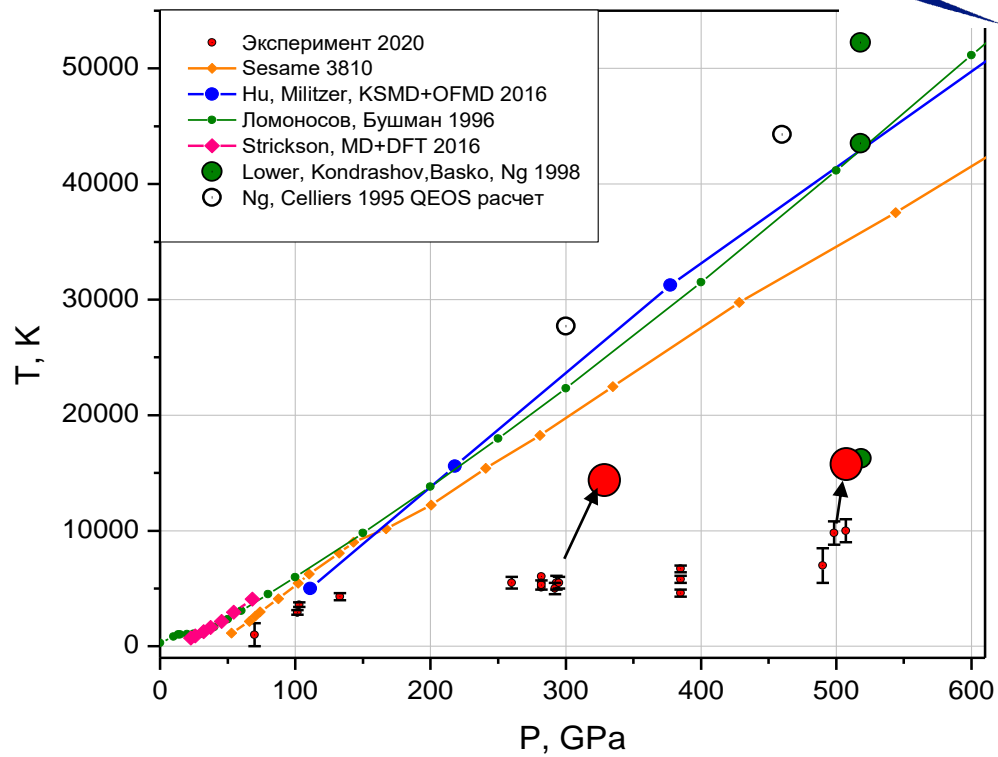
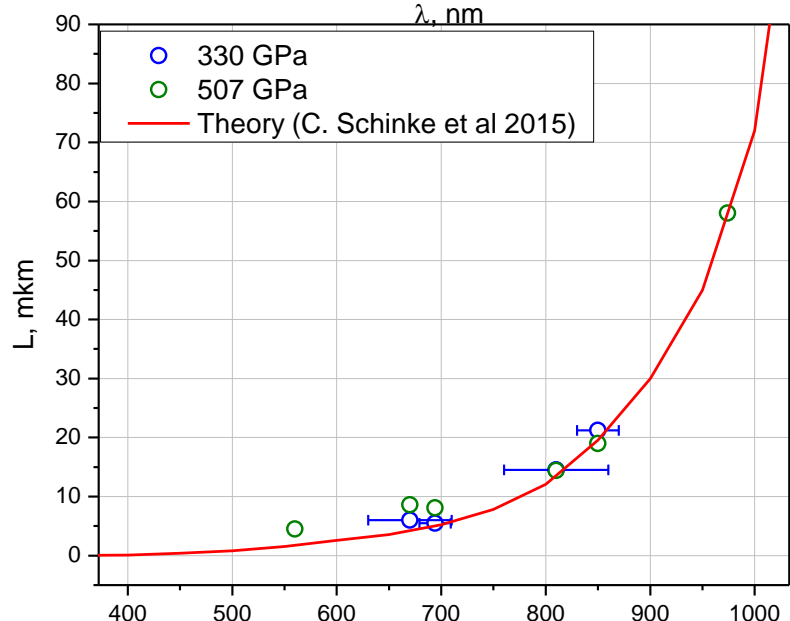
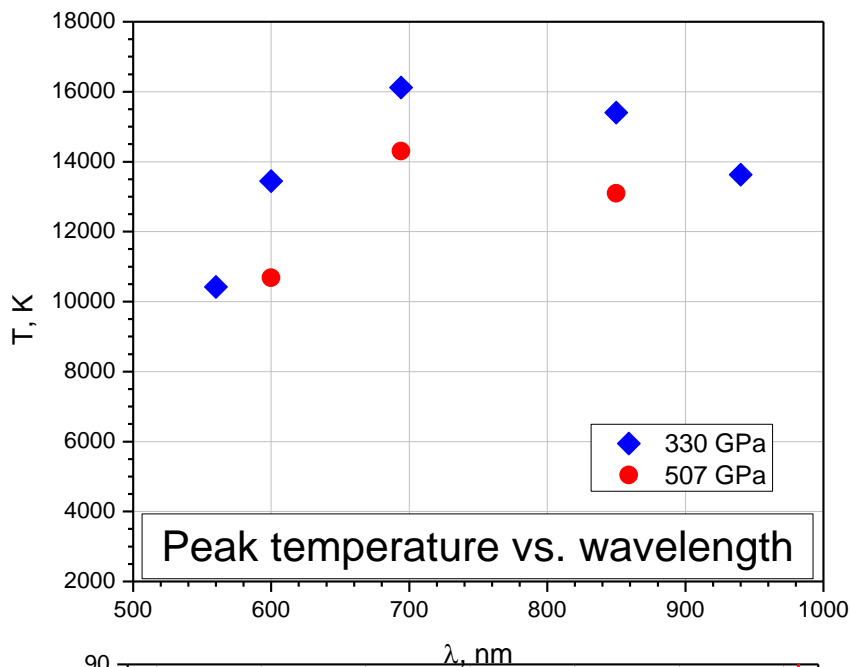
Обработка: при известном D линейная зависимость $I(t) > I(d) > \text{коэффициент поглощения}$ и длина пробега фотонов



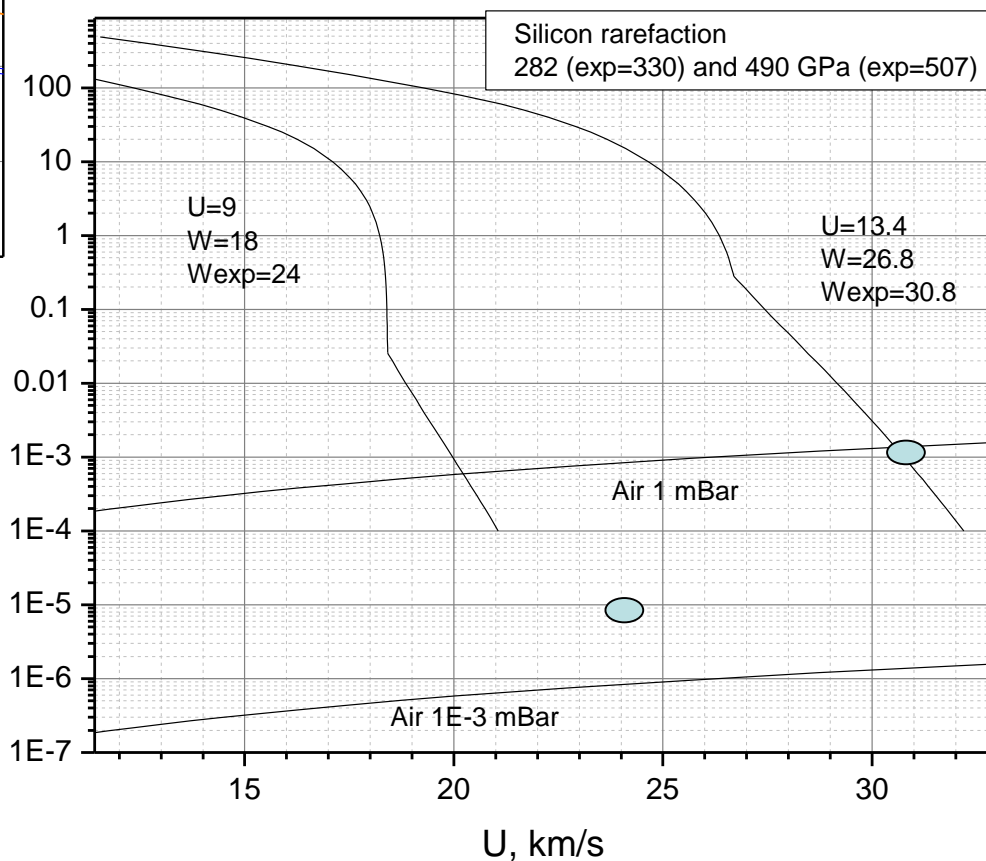
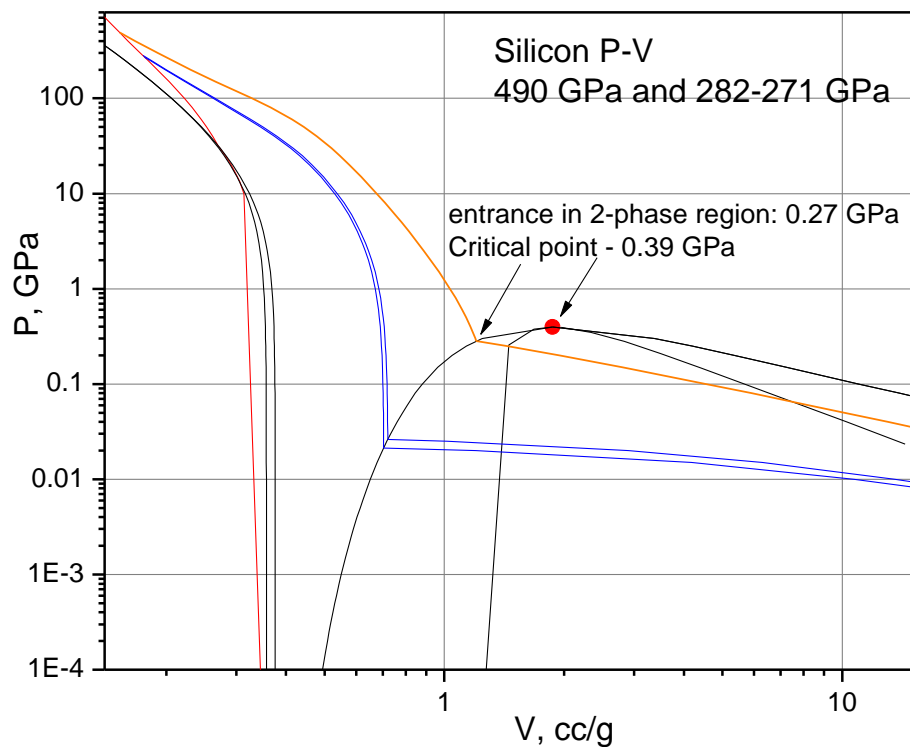
Кремниевая пластина для микросхем $d=0.35\text{мм}$



Температуры в пике подросли, но не дотягивают до расчетных. Пробеги фотонов соответствуют холодному кремнию



Эксперимент с $P_H=507$ GPa: изоэнтропа разгрузки близка к критической



Ударные адиабаты воздуха – по данным из книги Попов, Цикулин

Вероятно, во втором эксперименте был плохой вакуум, около 1 мБар (в первом – 0.01 мБар)

Выводы

Получены новые данные по ударной сжимаемости монокристаллического кремния до давления 507 ГПа. Подтверждается значительно более мягкий ход ударной адиабаты по сравнению с экстраполяцией точек Павловского 1967 г.

Получены данные о яркостной температуре фронта УВ в кремнии в ик-диапазоне ($\lambda = 1300-1800\text{nm}$) в области давления 70 – 507 ГПа

Полученная температура оказалась значительно ниже, чем дают расчеты по известным уравнениям состояния

Возможное объяснение – оптический эффект типа экранирования ик-излучения слоем с высокой электронной плотностью перед фронтом ударной волны.

Одно из возможных объяснений - механизм фотоионизации

Выполнены эксперименты по наблюдению выхода ударной волны в вакуум. Температуры в пике выросли до 14-16 кК, но так же не дотягивают до расчета. Экранирование влияет и на эту постановку.

Нарадания сигнала пересчитаны в коэффициенты поглощения на 4 длинах волн. Пробеги фотонов соответствуют холодному кремнию.

Спасибо за внимание!

