

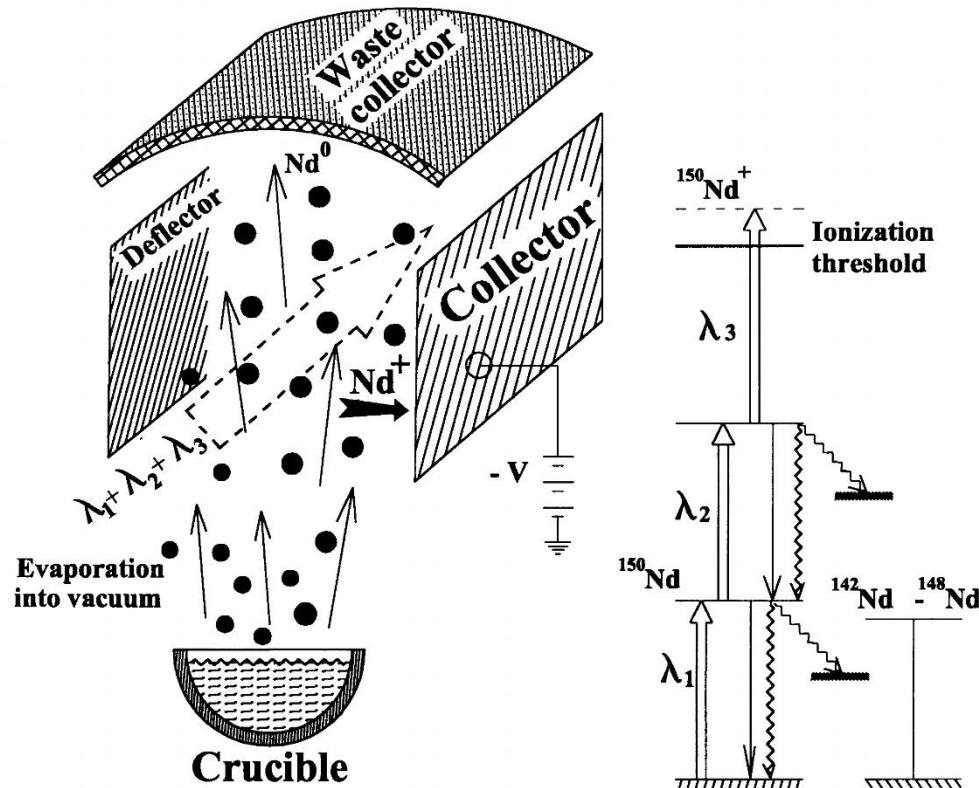
Применение лазерной АВЛИС технологии для получения ^{150}Nd

НИЦ «Курчатовский институт»

Принцип АВЛИС метода

ALIS – Atomic Vapor Laser Isotope Separation

АВЛИС – атомный вариант лазерной изотопной сепарации

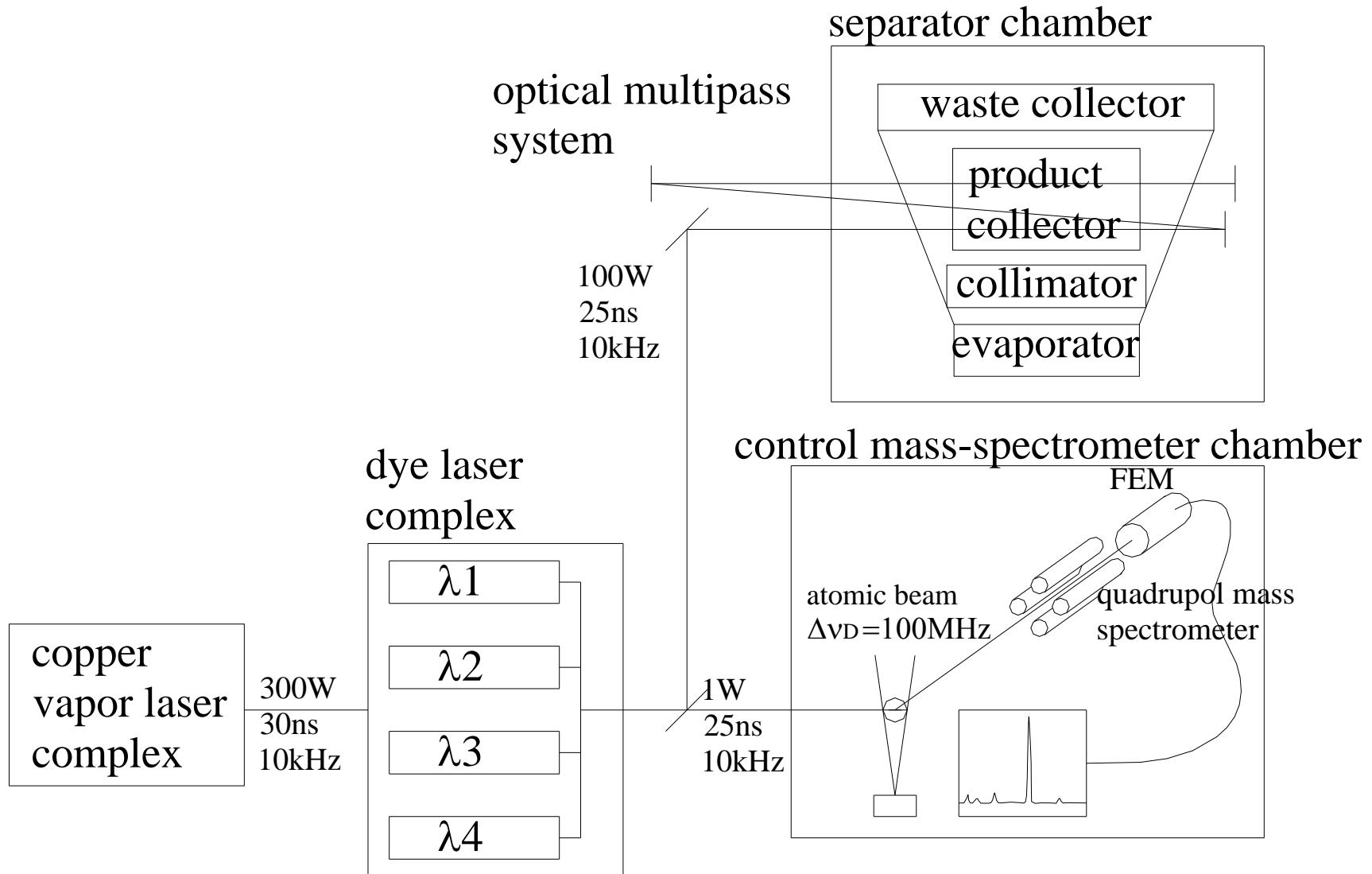


Поток испаренных атомов проходит через область лазерного излучения, где происходит селективная фотоионизация атомов. Фотоионы Nd-150 вытягиваются электрическим полем на коллектор продукта, в то время как атомы других изотопов, оставаясь нейтральными продолжают свой путь по прямой на коллектор отвала.

Преимущества

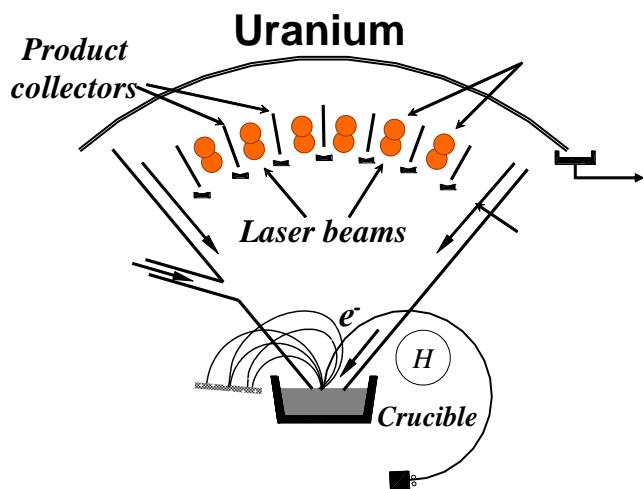
1. Универсальность. Не требует летучих соединений
2. Позволяет сконцентрировать ресурсы на выделении одного изотопа

Схема АВЛИС установки



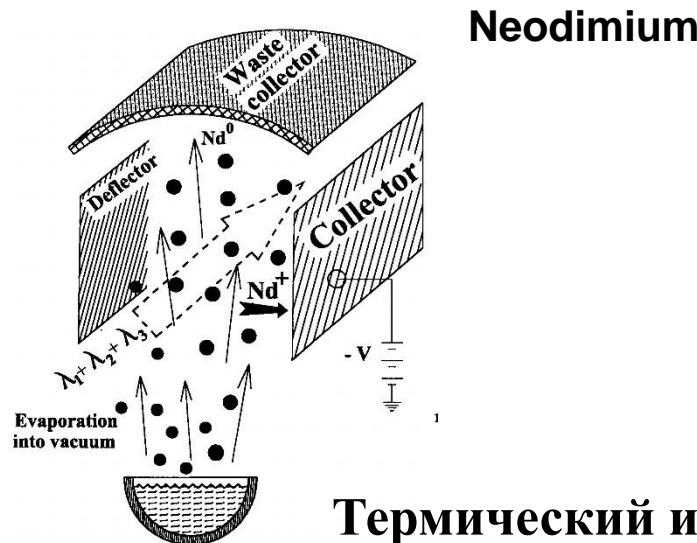
I.S.Grigoriev, A.B.Diachkov, S.K.Kovalevich, et al "AVLIS of neodymium", Proc. SPIE Vol.5121, p.406-410 (2003).

Особенности АВЛИС технологии для Nd



Электронно лучевой испаритель

Испарение Т ~ 3000 K
Изотопический сдвиг ~ 10 GHz
Доплеровское уширение ~ 1.5 GHz



Термический испаритель

Испарение Т ~ 1900 K
Изотопический сдвиг ~ 1.1 GHz
Доплеровское уширение ~ 1.2 GHz

Потребовалась разработка

- 1) Узкополосного одномодового лазера на красителях $\Delta v \sim 100$ MHz
- 2) Термического испарителя металлического неодима с коллимацией атомного потока.

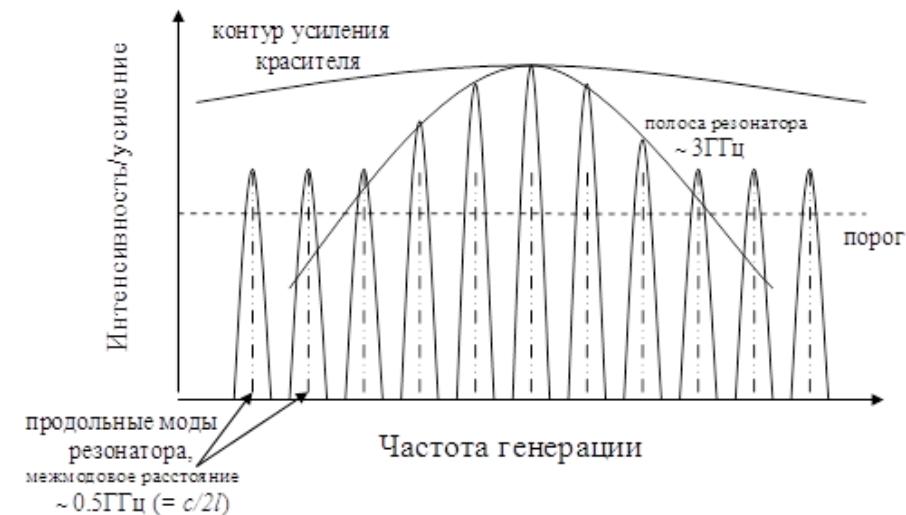
Разработка одномодового лазера на красителях

Генерация на 5÷6 модах ($\Delta\nu_{\text{рн}}=2\div3\text{ ГГц}$)

Многомодовый генератор лазера на красителе



Схема многомодового генератора не красителях: (1) выходное зеркало; (2) кювета с красителем; (3) поляризатор
(4) призматический телескоп; (5,8) цилиндрические линзы; (6) дифракционная решетка; (7) глухое зеркало



Генерация на одной моде ($\Delta\nu_{\text{рн}}=0.1\div0.15\text{ ГГц}$)

Одномодовый генератор лазера на красителе

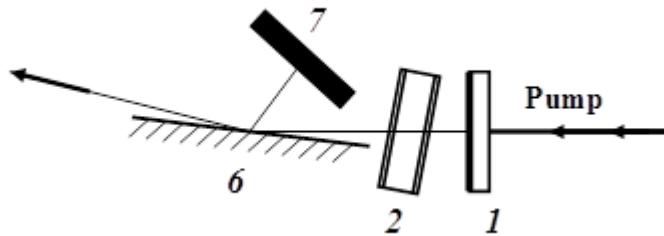


Схема одномодового генератора не красителях: (1) дихроичное зеркало; (2) кювета с красителем; (6) дифракционная решетка; (7) глухое зеркало

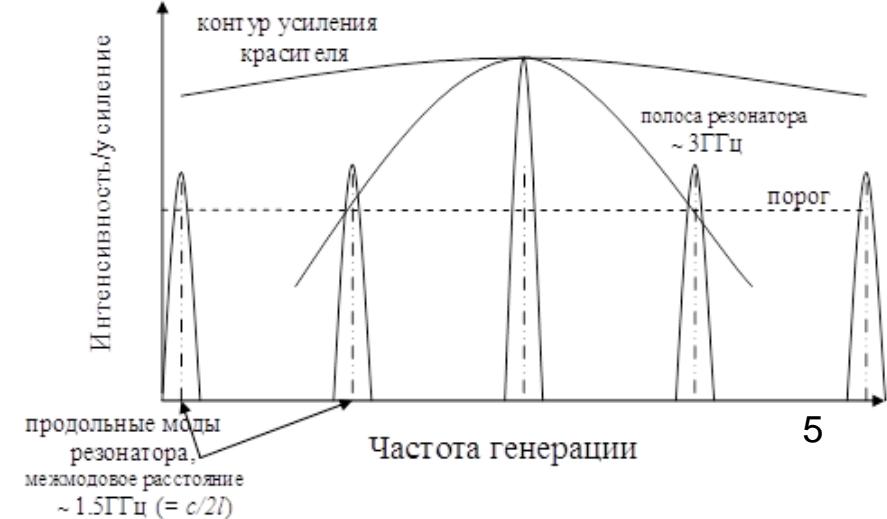
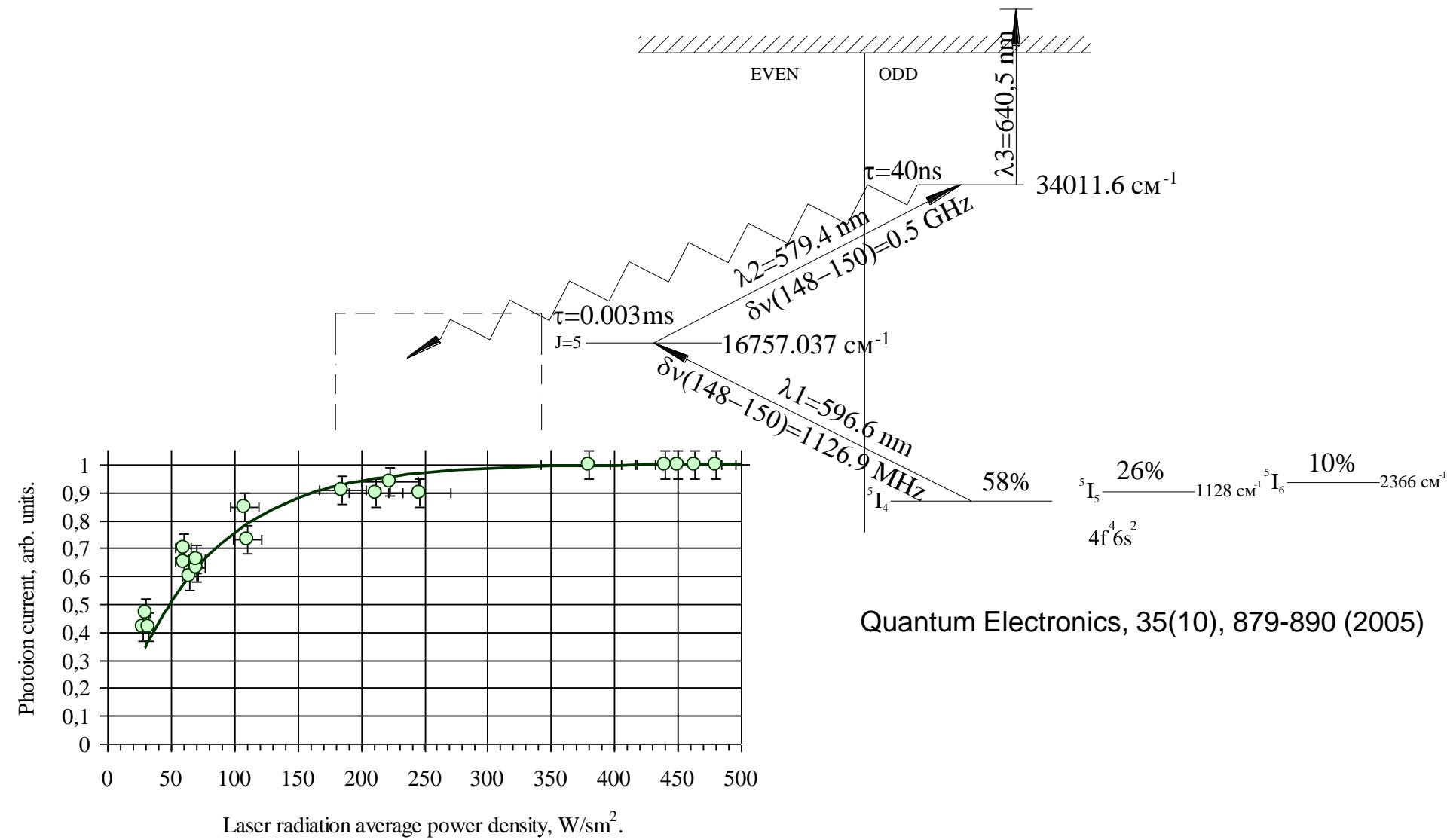


Схема фотоионизации неодима

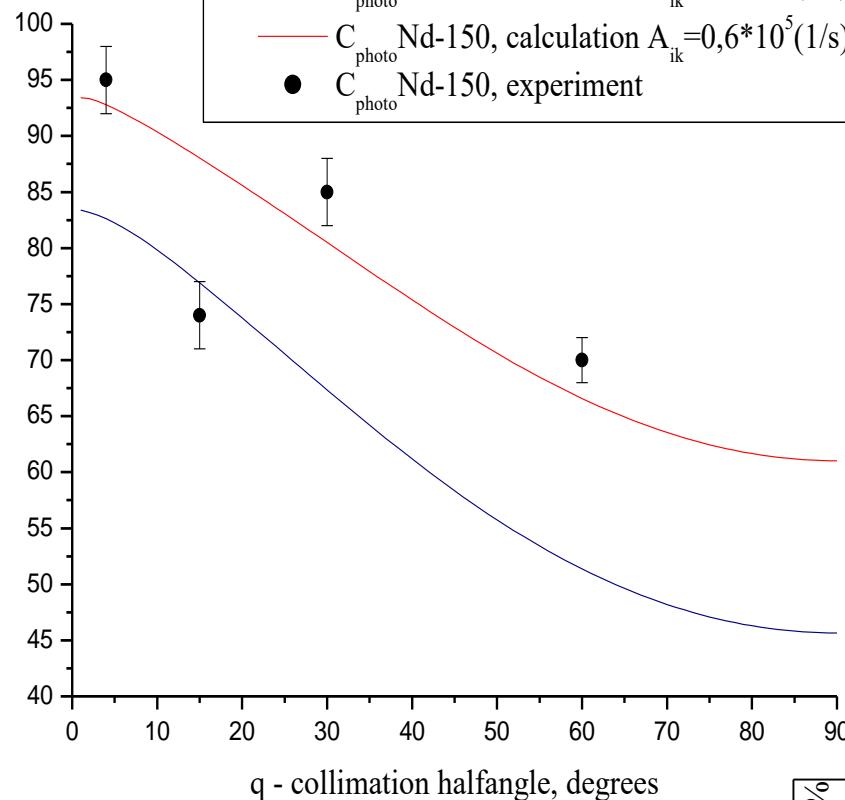


Quantum Electronics, 35(10), 879-890 (2005)

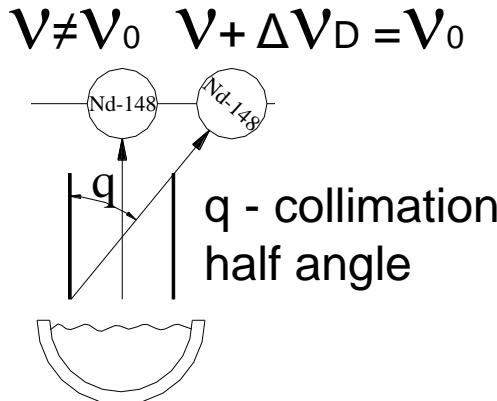
Экспериментальная зависимость фотоионного тока Nd-150 от средней плотности мощности лазерного излучения третьей ступени $\lambda_3 = 6405\text{ \AA}$. Средняя плотность мощности первой $\lambda_1 = 5966\text{ \AA}$ и второй $\lambda_2 = 5794\text{ \AA}$ ступеней равны $3,8\text{ Вт/см}^2$ и 6 Вт/см^2 соответственно.

Влияние допплеровского уширения

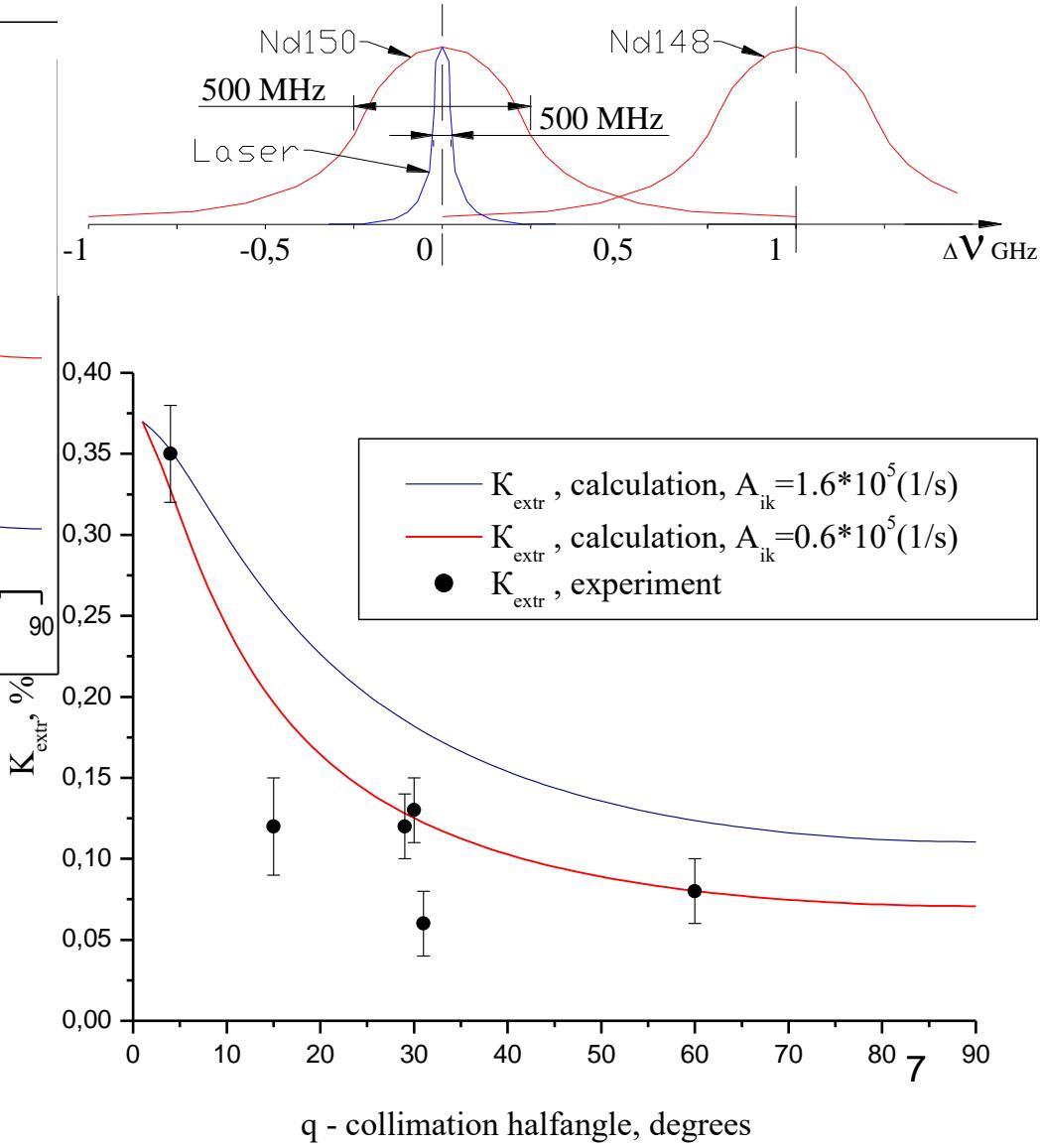
C_{photo} , Nd-150, %

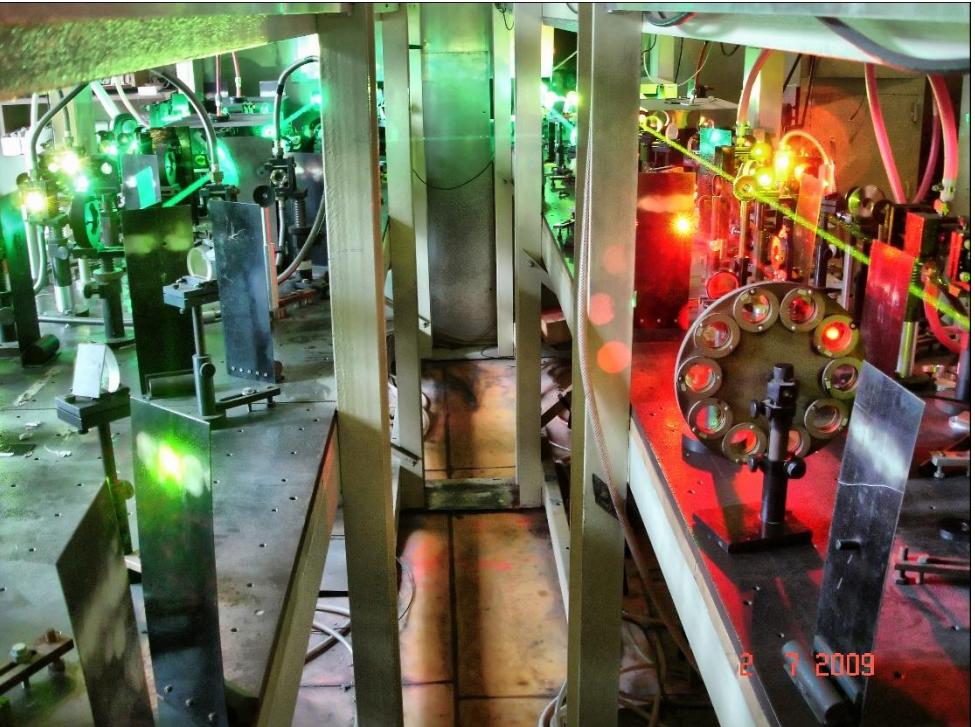


laser



$$V \neq V_0 \quad V + \Delta V_D = V_0$$





Amplifiers of Copper Vapor Laser (CVL) system.
Total average power 300W.
Pulse duration 30ns, repetition rate 10kHz.

Dye laser system.
Spectral half width 100MHz,
total average power 100W



Separator for AVLIS of the Rear Earth elements.

Наработка Nd150

Результаты измерений образца Nd № 424 от 11.07.2007,
представленных Ковалевичем С.К.

| Изотоп а.с.м № образца | Концентрация изотопов, % атомн. | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 148 | 150 |
| 424 | 8,4 ^{+0,05} | 4,2 ^{+0,05} | 8,4 ^{+0,05} | 3,4 ^{+0,05} | 8,3 ^{+0,05} | 7,4 ^{+0,05} | 59,1 ^{+0,15} |

Начальник лаборатории:
Исполнитель:

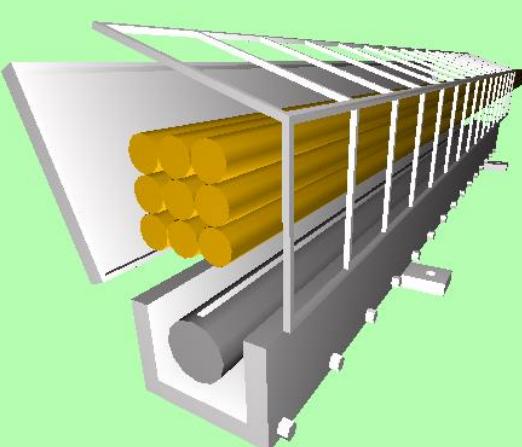
А.П. Бабичев

М.А. Бурлак

12.07.07

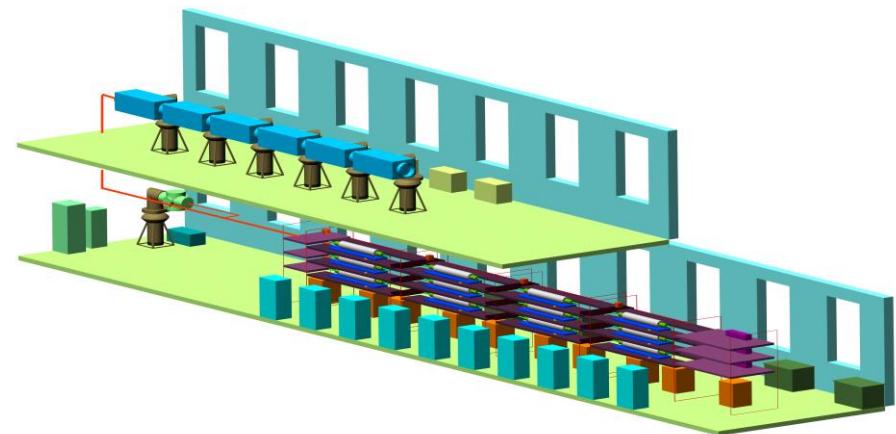
Масса образца - 1г

Experimental Separation Cell



| | |
|-----------------------|-----------|
| Length | 0.3 m |
| Evaporation Rate | 120 g/day |
| Productivity | 1 g/day |
| Product Concentration | 60 % |
| CVL Average Power | 300 W |
| Dye Average power | 100 W |

Nd Enrichment Facility

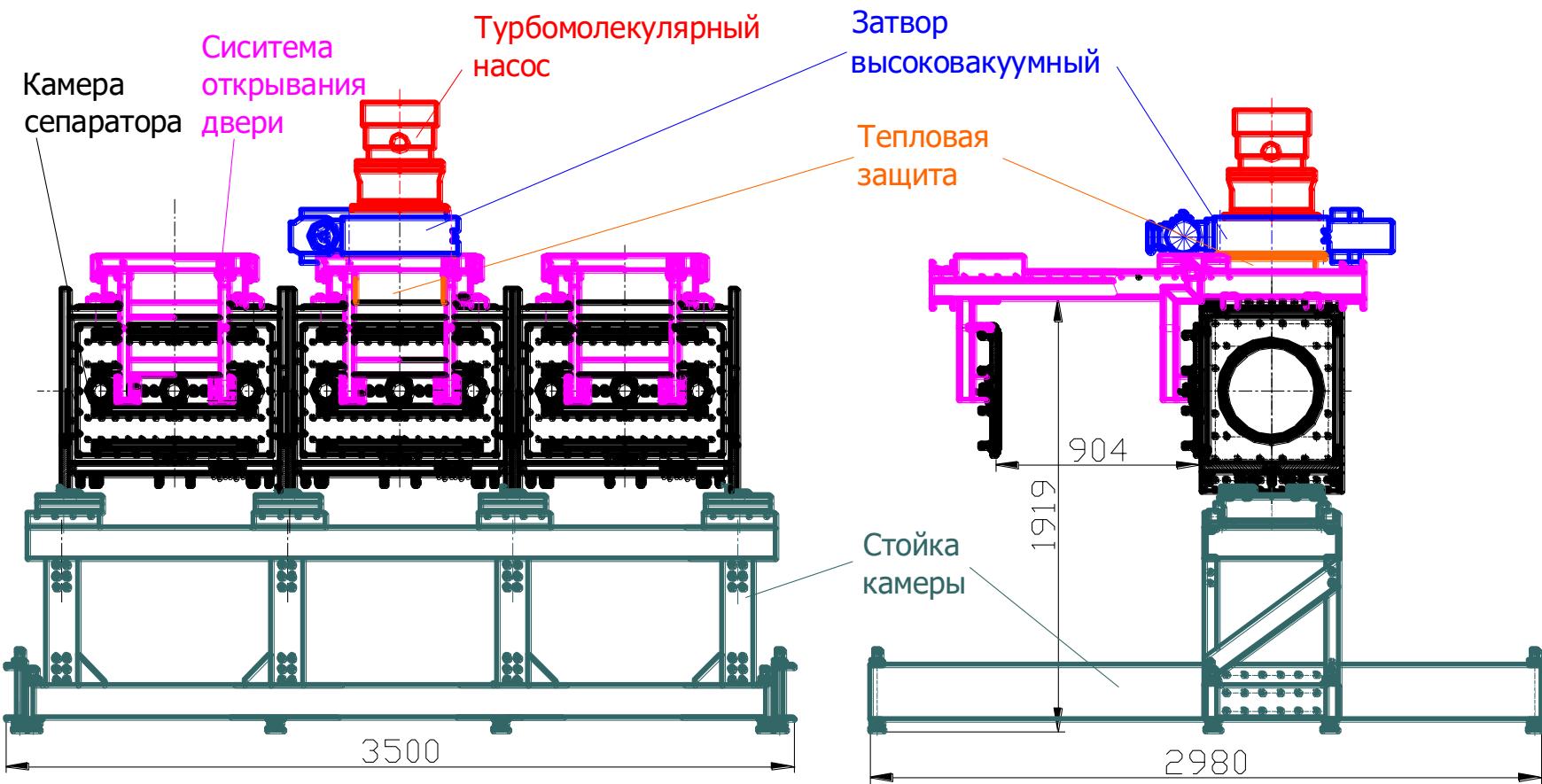


| | |
|-----------------------|-----------------|
| Length | 10 m (30 cells) |
| Evaporation Rate | 6 kg/day |
| Productivity | 30 kg/year |
| Product Concentration | 60 % |
| CVL Average Power | 1000 W |
| Dye Average power | 300 W |

Rough estimations of the time and budget necessary to produce ~100kg of Nd-150, ~60%

| | <i>Separator</i> | <i>Lasers</i> | <i>Documents</i> | <i>Total</i> |
|-------------|---|---|---|------------------------------|
| 2010 | Separator Unit Design 200 k\$ | PD-SSL Test 300 k\$ | Technical – Economic Calculation 200 k\$ | 700 k\$ |
| 2011 | Separator Unit Construction & Test 200 k\$ | Laser System Design 300 k\$ | Technical Project 1500 k\$ | 2100 k\$ |
| 2012 | Separator Production & Assembling 1000 k\$ | Laser System Construction 1000 k\$ | | 2000 k\$ |
| 2013 | | Production of 30 kg | | 1500 k\$ |
| 2014 | | Production of 30 kg | | 1500 k\$ |
| 2015 | | Production of 30 kg | | 1500 k\$ |
| | | | | 9300 k\$₁₂ |

Разработка сепаратора



Создание сепаратора

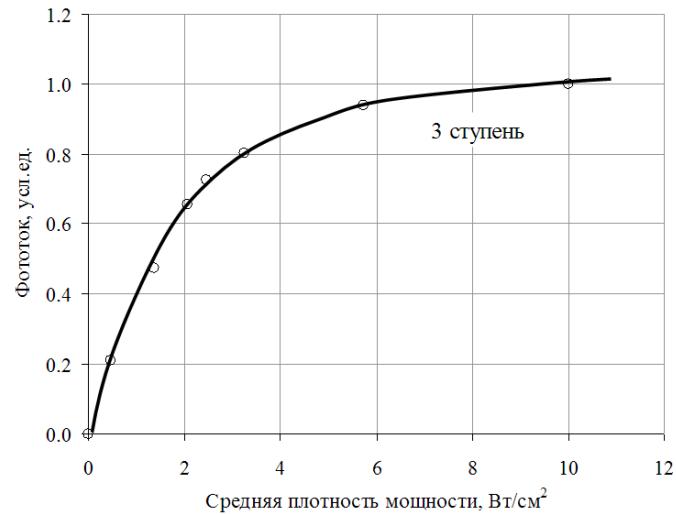
- Возможностьстыковки модулей в цепочку.
- Возможность непрерывной работы.
- Удобство работы и обслуживания камеры.
- Применена современная система безмасляной откачки.

Установка для испытания модуля сепаратора

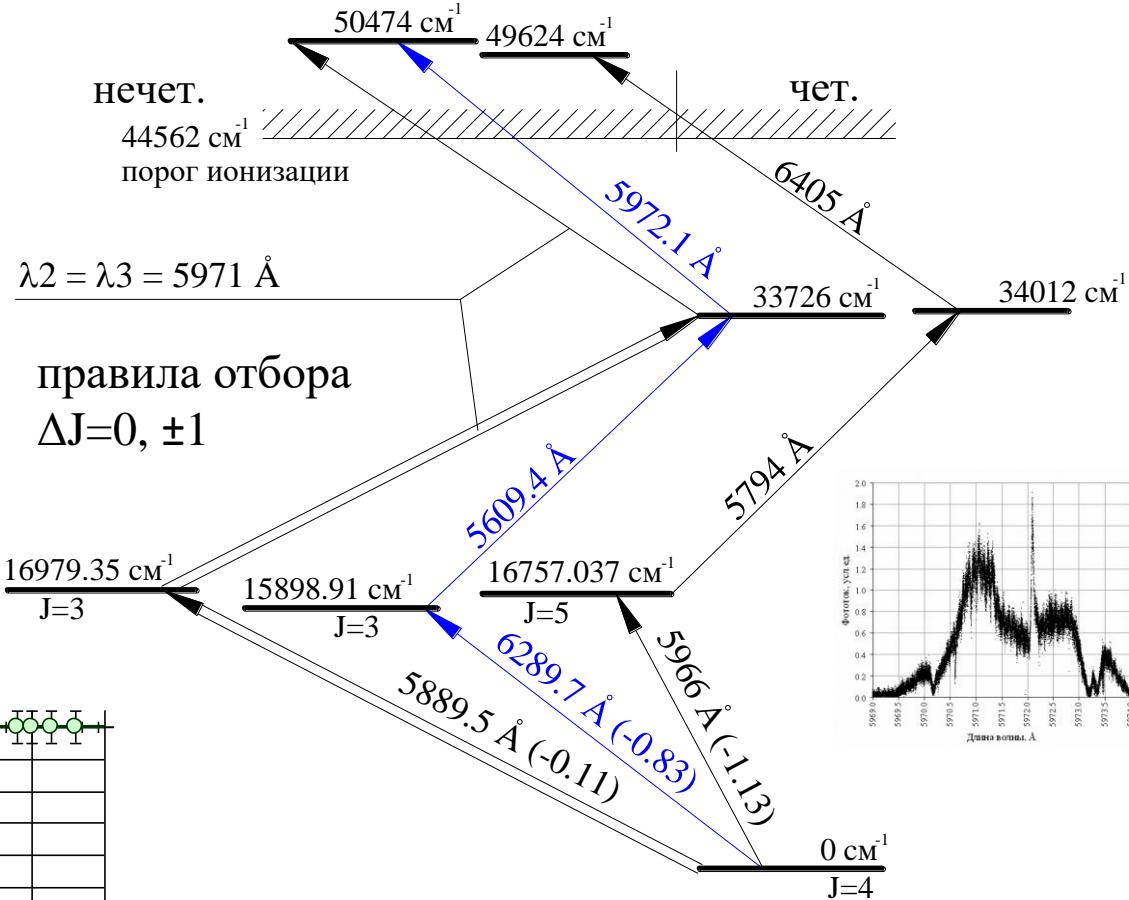
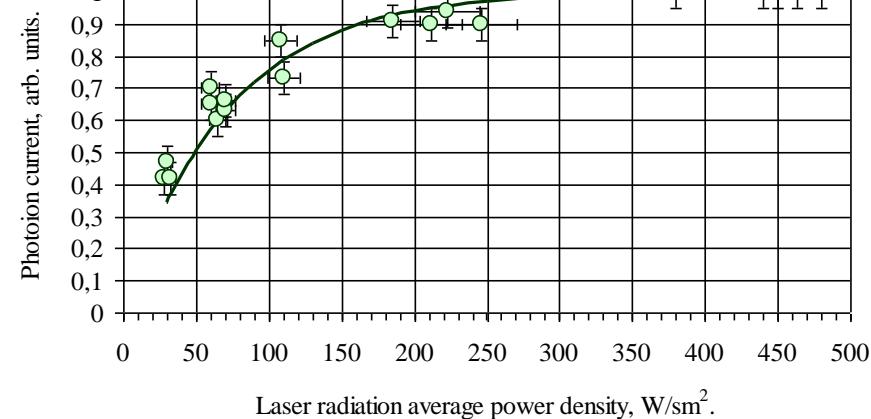
- Число модулей – 2-3 шт
- Число ячеек – 4-6 шт
- Производительность - 4-6 г/сутки



Поиск схемы фотоионизации с высоким сечением



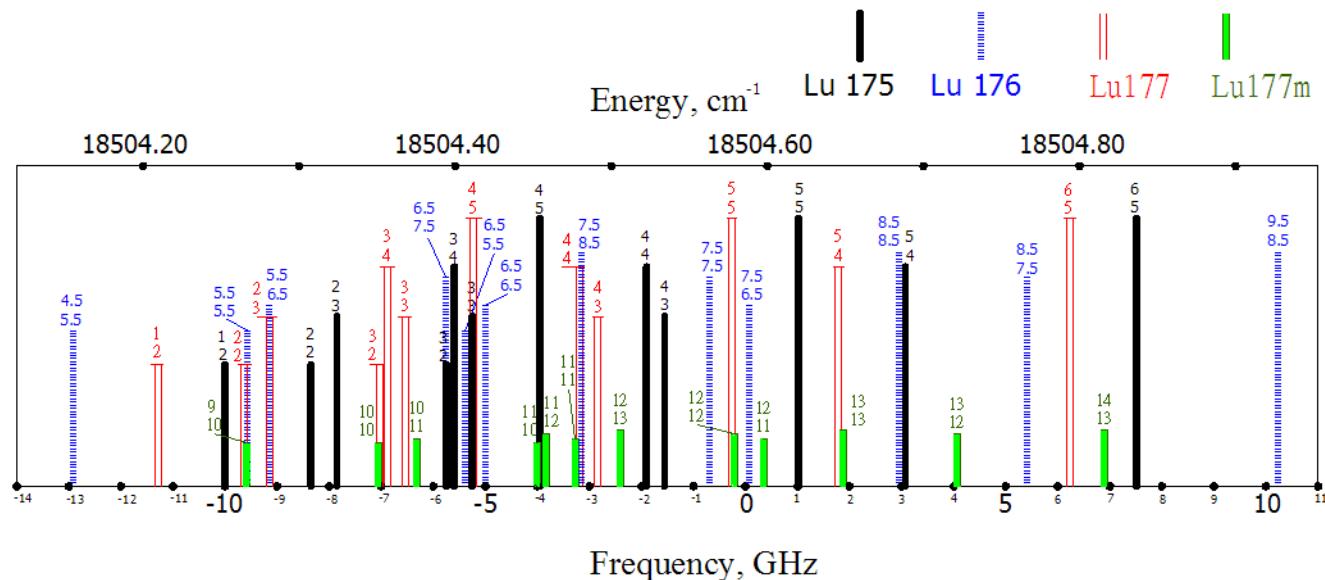
3 ступень



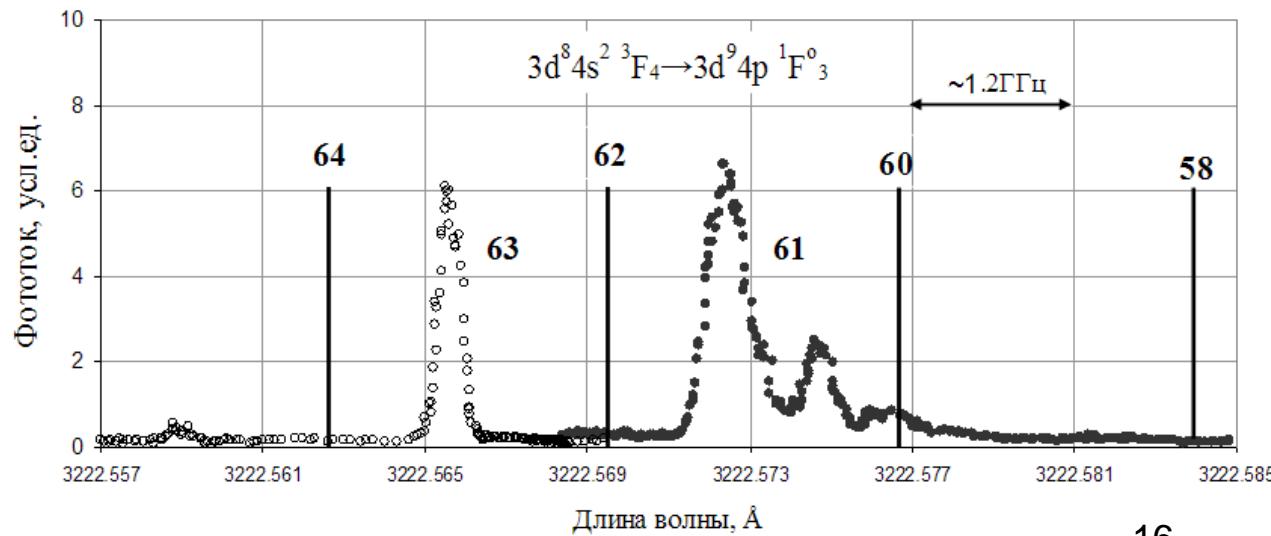
Зюзиков А.А., Мишин В.И., Федосеев В.Н.
Оптика и спектроскопия, 64(3), 480 (1988)¹⁵

Применение разработок для разделения изотопов других элементов

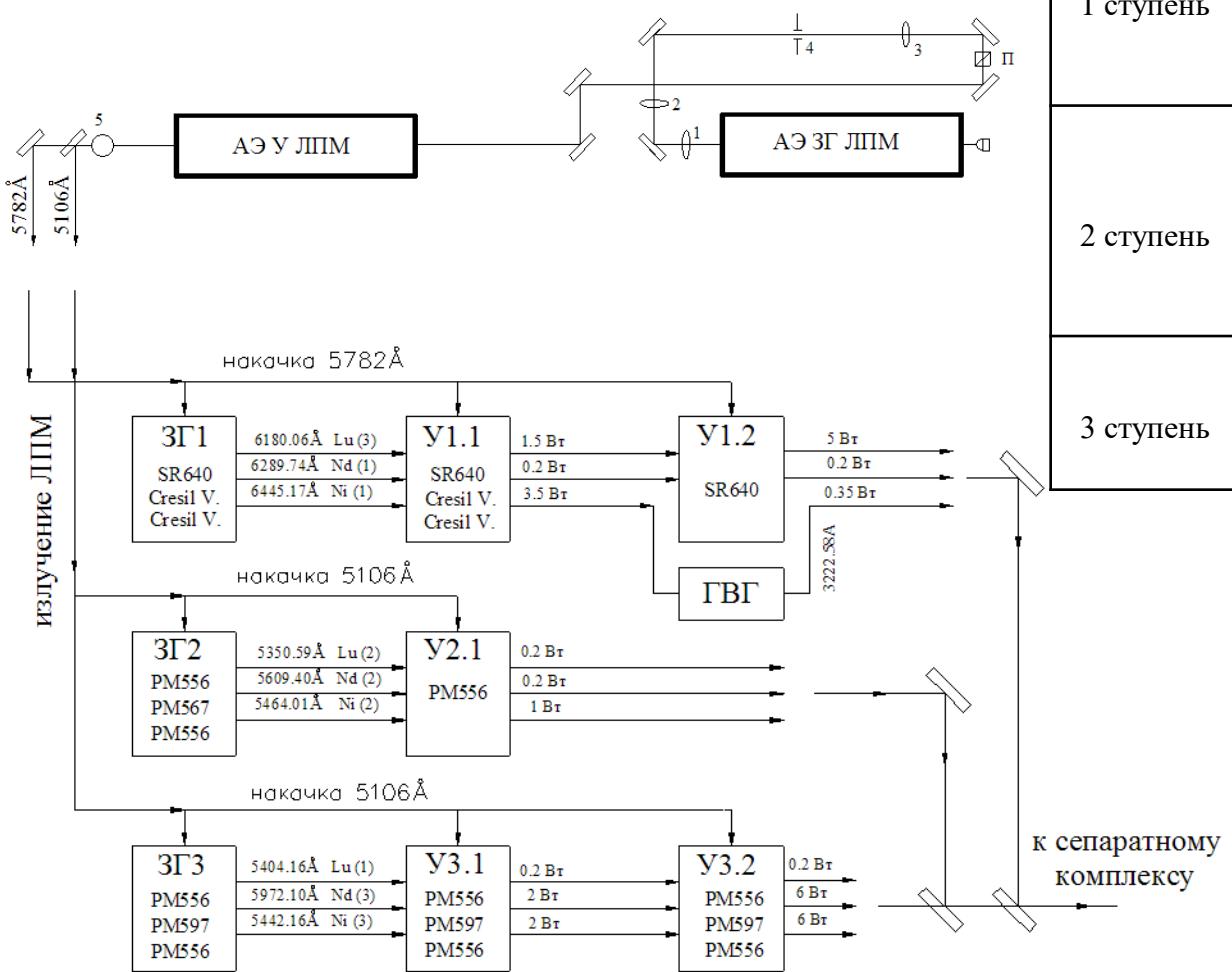
Разделение
изотопов лютения
для медицины
540,4 нм



Выделение
радионуклида ⁶³Ni для
автономных
источников питания
322,2 нм



Разработка лазерного АВЛИС комплекса для выделения изотопа ^{150}Nd и радионуклидов ^{177}Lu и ^{63}Ni .



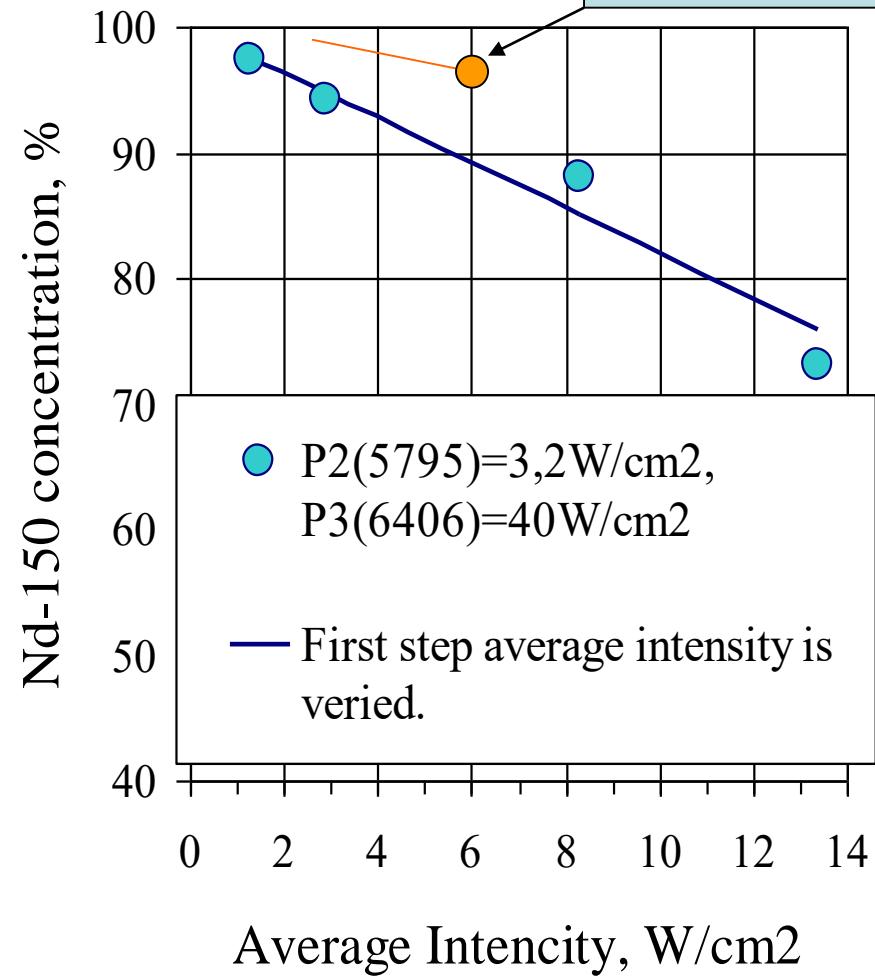
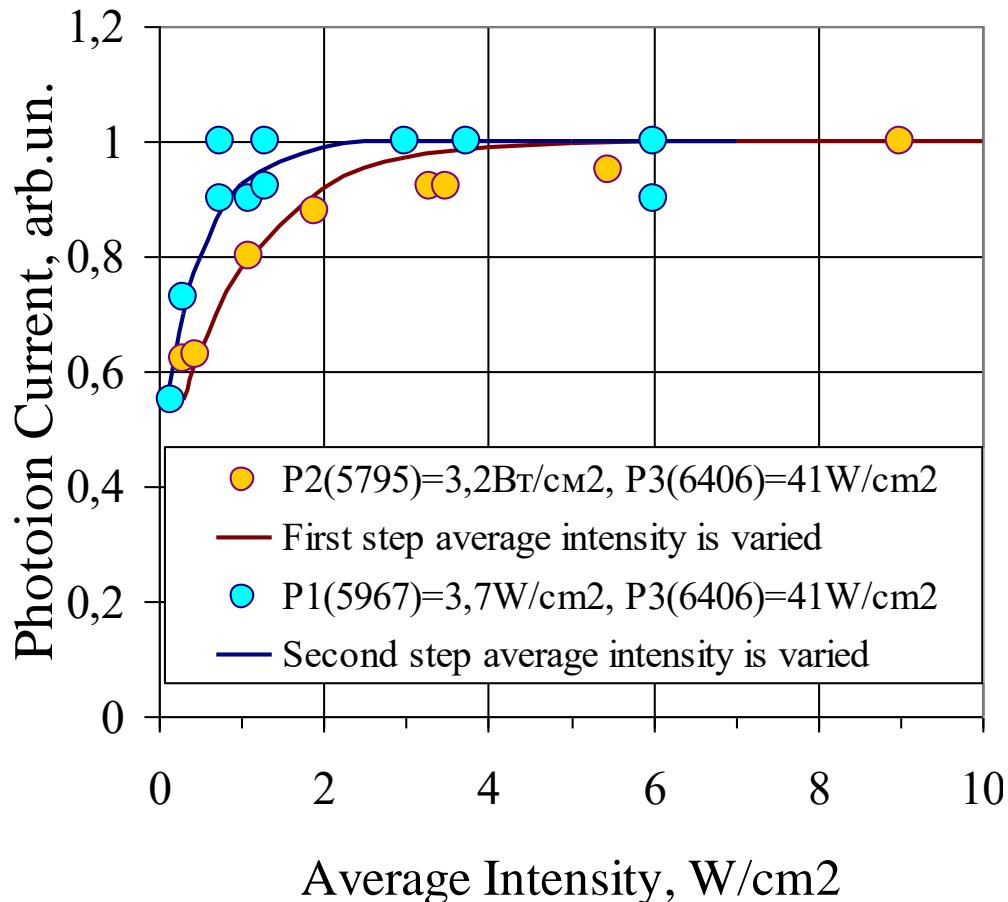
| | Nd | Lu | Ni |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 ступень | 6289.74 Å 0.06 Bm/cm ² | 5404.16 Å 0.01 Bm/cm ² | 3222.58 Å 0.08 Bm/cm ² |
| 2 ступень | 5609.40 Å 0.06 Bm/cm ² | 5350.59 Å 0.01 Bm/cm ² | 5464.01 Å 0.02 Bm/cm ² |
| 3 ступень | 5972.1 Å 6 Bm/cm ² | 6180.06 Å 2 Bm/cm ² | 5442.16 Å 5 Bm/cm ² |

Выводы

- 1) Создана технология лазерного АВЛИС разделения изотопов неодима применительно к задаче выделения изотопа ^{150}Nd из природной смеси для поиска двойного безнейтринного бета распада и массы нейтрино
- 2) Разработан и спроектирован модуль сепаратора промышленной установки, способной произвести 100 кг обогащенного неодима.
- 3) Завершается создание установки для испытания модуля сепаратора промышленной установки, состоящей из двух модулей.
Производительность установки 200 -2000 г обогащенного неодима в год.
- 4) Разработка технологии разделения изотопов неодима позволила расширить возможности АВЛИС метода до решения других практически важных задач – выделение радионуклида ^{177}Lu для медицины и радионуклида ^{63}Ni для автономных источников питания.

Neodymium selectivity

Atomic Beam, 4° divergence, $\Delta VD = 100$ MHz



^{142}Nd - 27,11%

^{144}Nd - 23,85%

^{146}Nd - 17,22%

^{150}Nd - 5,62%

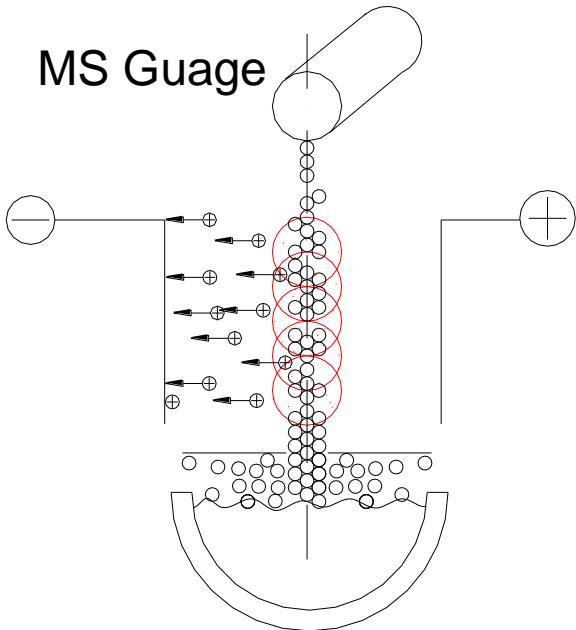
^{143}Nd - 12,17%

^{145}Nd - 8,30%

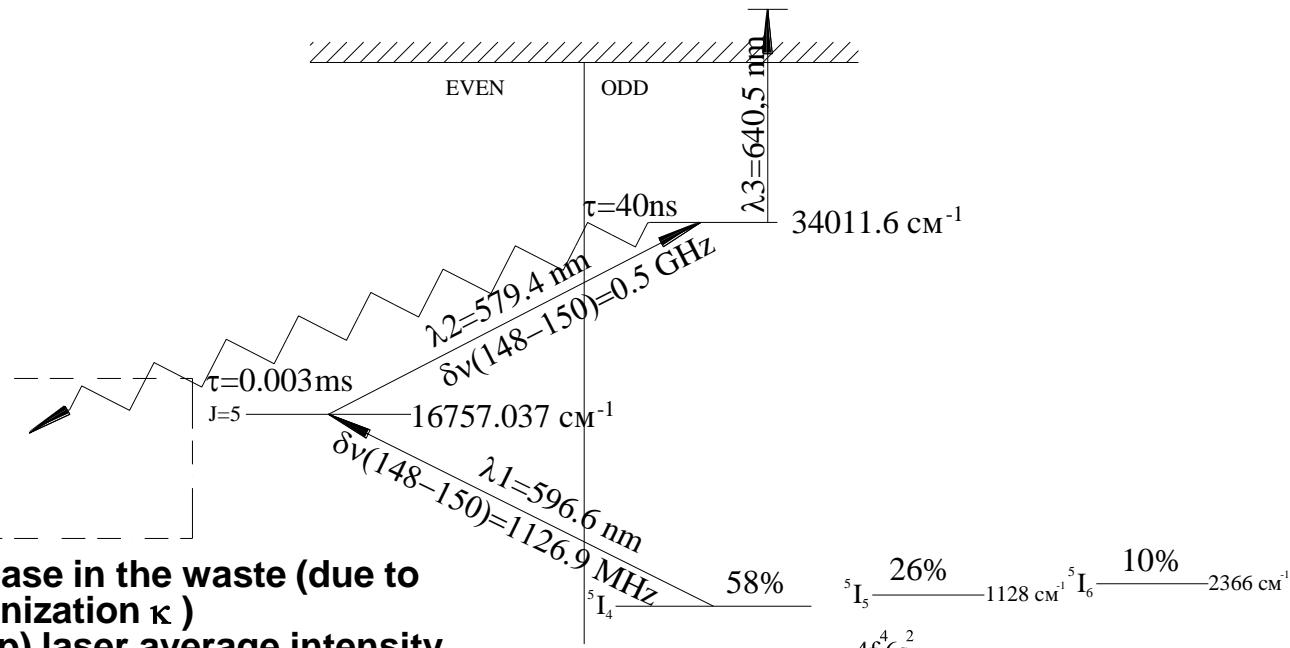
^{148}Nd - 5,73%

P1=2,1 W/cm^2
P2=5,4 W/cm^2
P3=300 W/cm^2

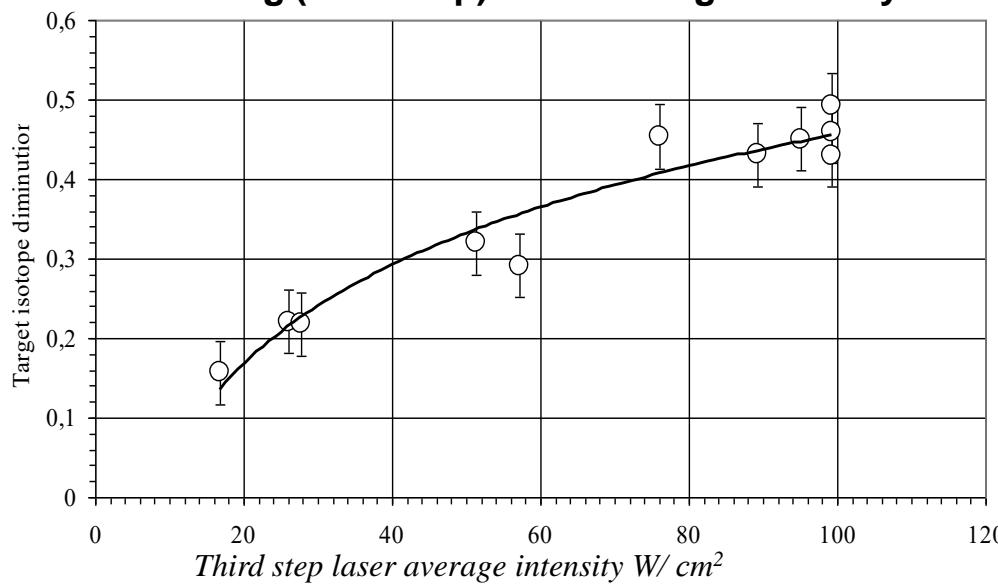
MS Guage



Neodymium Photoionization Scheme



Target isotope decrease in the waste (due to photoionization κ) vs. ionizing (third step) laser average intensity



Probability of photoionization while passing the interaction area

$$\eta = \kappa / C = 0.45 / 0.58 = 0.78$$

ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им.И.В.КУРЧАТОВА

Сектор 28

"УТВЕРЖДАЮ"

Кимин
И.К.Кикоин

"20" Июня 1968г.

МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ, ОСНОВАННЫЕ
НА СЕЛЕКТИВНОМ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ

НАЧАЛЬНИК СЕКТОРА

СМОРОДИНСКИЙ Я.А.

ИСПОЛНИТЕЛИ

КУДРИН Л.П.

НОВИКОВ В.М.

БЛИНКИН В.Л.

| Изотоп | Начальная концентрация | Концентрация в продукте | Селективность или производительность в г/сутки |
|-------------------|------------------------|-------------------------|--|
| ^{6}Li | 7.5% | 99.95% | 24000 |
| ^{7}Li | 92.5% | 99.8% | 40 |
| $^{6}\text{Li}_2$ | 7.5% | 53% | 14 |
| $^{7}\text{Li}_2$ | 92.5% | 97.7% | 24 |
| ^{42}Ca | 0.65% | 97.3% | 5500 |
| ^{44}Ca | 2.09% | 96.7% | 1400 |
| ^{48}Ca | 0.19% | 91.2% | 5590 |
| ^{150}Nd | 5.6% | 99% | 1670 |
| ^{150}Nd | 5.6% | 67% | 1 г/сутки |
| ^{144}Sm | 3.09% | 91.5% | 280 |
| ^{148}Sm | 11.3% | 94.8% | 144 |
| ^{152}Sm | 26.7% | 97.7% | 120 |
| ^{154}Sm | 27.7% | 98.7% | 260 |
| ^{156}Gd | 50% | 95% | 20 |
| ^{160}Gd | 50% | 96% | 20 |
| ^{176}Lu | 2.59% | 94.5% | 650 |
| ^{176}Lu | 2.59% | 65% | 0.12 г/сутки |
| ^{63}Ni | 1% | 93% | 1200 |

Atomic Beam

2° collimation half angle,

$\Delta VD = 100$ MHz

Low density, now collisions

Very low flux and productivity

Atomic Flux

30° -60° collimation half angle,

$\Delta VD \sim 400 - 1000$ MHz

Significant density, atom collisions

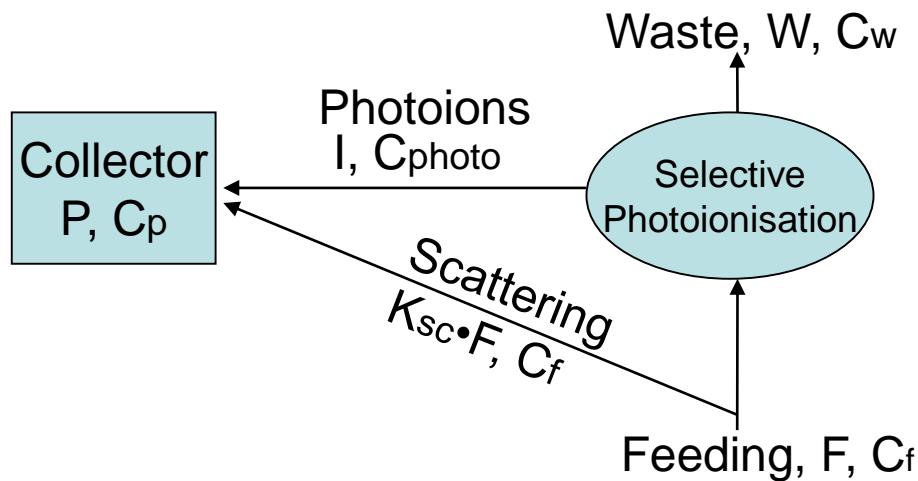
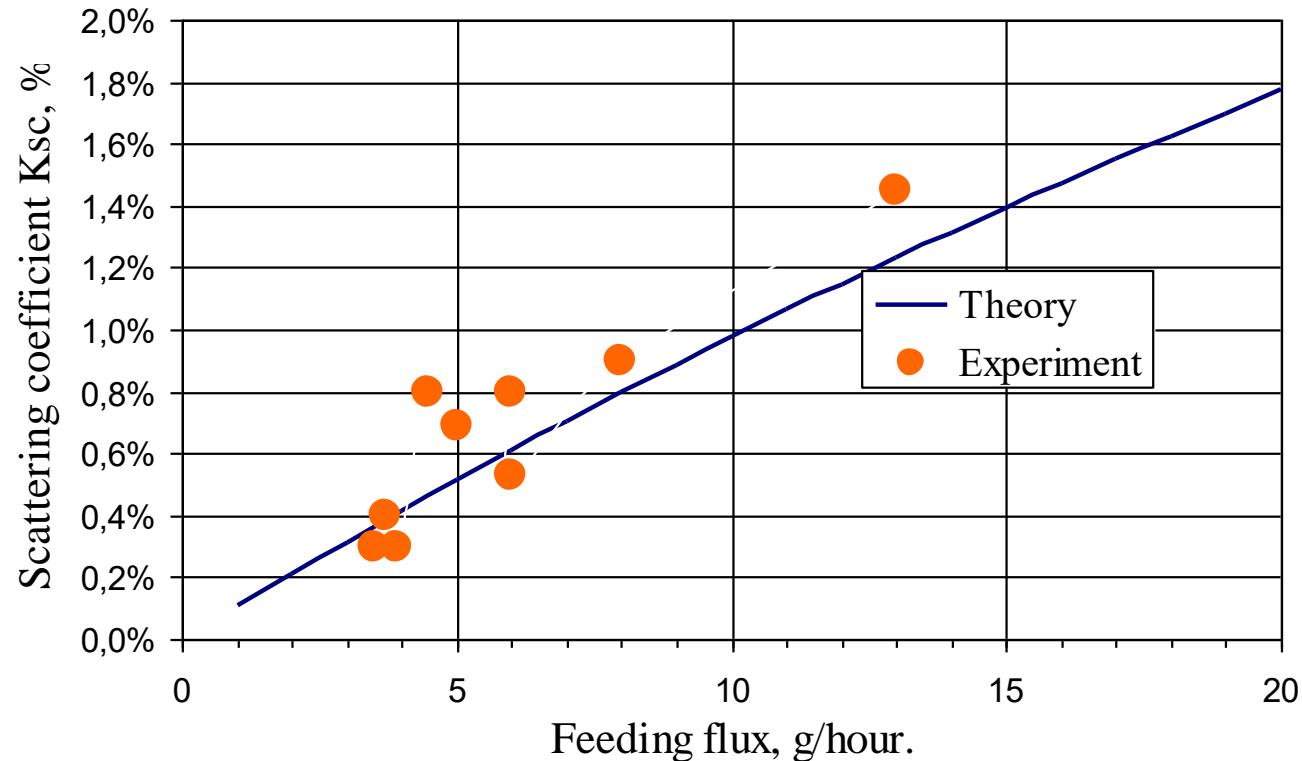
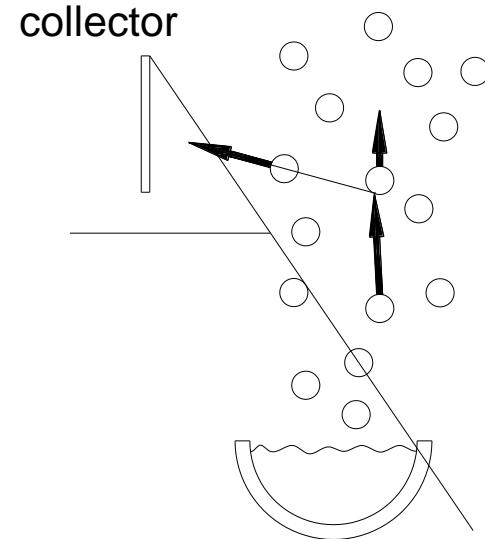
High flux and significant productivity, but ...

Deselecting Processes

Doppler broadening

Scattering of atoms in
operation volume

Scattering of Atoms



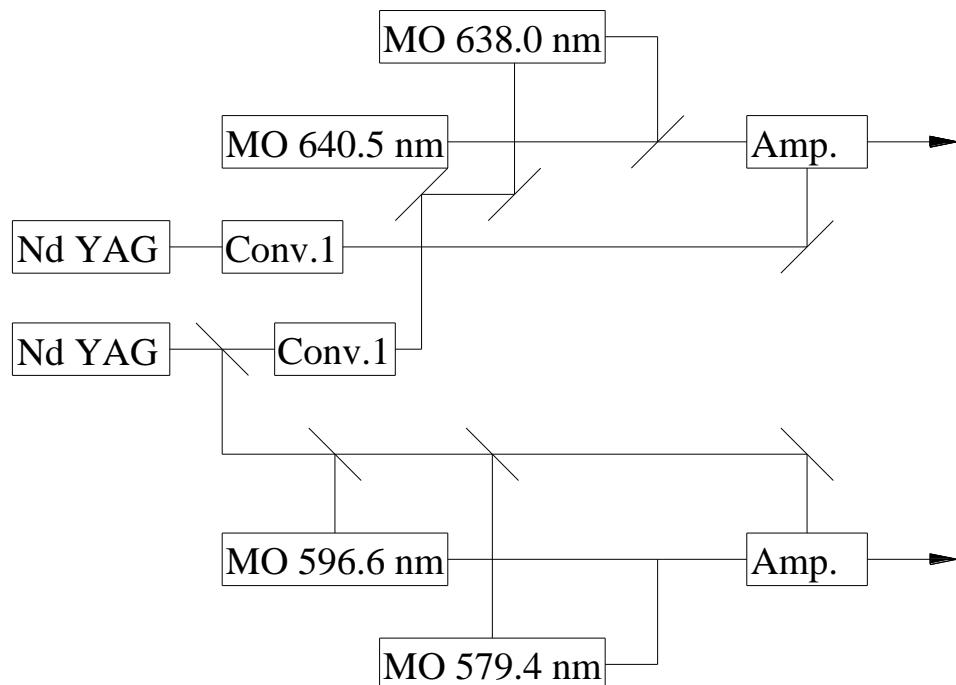
Enrichment Facility Development

Step1. Separator Unit Design.

Step2. Separator Unit Construction and Test.

Step3. Separator Units Production and Assembling.

Step4. Enriched Neodymium Production



ETNA HP Nd:YAG, 150W at 532 nm.
A candidate?